

### Analyse und Bewertung der Resilienz urbaner Wärmeversorgungskonzepte - Methodenentwicklung und Anwendung

Röder, Johannes; Mitzinger, Tino; Thier, Pablo; Wassermann, Timo;  
Dunkelberg, Elisa

Veröffentlichungsversion / Published Version  
Arbeitspapier / working paper

#### Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Röder, J., Mitzinger, T., Thier, P., Wassermann, T., & Dunkelberg, E. (2020). *Analyse und Bewertung der Resilienz urbaner Wärmeversorgungskonzepte - Methodenentwicklung und Anwendung*. (artec-paper, 225). Bremen: Universität Bremen, Forschungszentrum Nachhaltigkeit (artec). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-73223-8>

#### Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

#### Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

# Analyse und Bewertung der Resilienz urbaner Wärmeversorgungskonzepte – Methodenentwicklung und Anwendung

Johannes Röder, Tino Mitzinger, Pablo Thier,  
Timo Wassermann, Elisa Dunkelberg

Das artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit ist ein interdisziplinäres Zentrum der Universität Bremen zur wissenschaftlichen Erforschung von Fragen der Nachhaltigkeit. Das Forschungszentrum Nachhaltigkeit gibt in seiner Schriftenreihe „artec-paper“ in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeiter\*innen sowie ausgewählte Arbeitspapiere und Berichte von Forschungsprojekten heraus.

# Impressum

## Herausgeber:

Universität Bremen  
artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit  
Postfach 33 04 40  
28334 Bremen  
Tel.: 0421 218 61801  
Fax: 0421 218 98 61801  
URL: [www.uni-bremen.de/artec](http://www.uni-bremen.de/artec)

## Kontakt:

Katja Hessenkämper  
E-Mail: [hessenkaemper@uni-bremen.de](mailto:hessenkaemper@uni-bremen.de)

# Analyse und Bewertung der Resilienz urbaner Wärmeversorgungskonzepte – Methodenentwicklung und Anwendung

Johannes Röder <sup>a,\*</sup>, Tino Mitzinger <sup>a</sup>, Pablo Thier <sup>a</sup>, Timo Wassermann <sup>a</sup>, Elisa Dunkelberg <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universität Bremen, Fachgebiet Resiliente Energiesysteme, Enrique-Schmidt-Straße 7, 28359 Bremen, Deutschland

<sup>b</sup> Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Potsdamer Straße 105, 10785 Berlin, Deutschland

\* [johannes.roeder@uni-bremen.de](mailto:johannes.roeder@uni-bremen.de)

*Diesen Artikel widmen wir Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann, der uns inspiriert, sein Wissen mit uns geteilt und sich mit großer Leidenschaft für die Energieforschung sowie eine nachhaltige Zukunft eingesetzt hat.*

## Kurzfassung

Die Energiewende weg von einem auf fossilen Brennstoffen basierenden und hin zu einem erneuerbaren, sektorgekoppelten Energiesystem bringt erhebliche strukturelle Anpassungen und Unsicherheiten mit sich. Resilienz, als Leitkonzept für entsprechende Transformationsprozesse, eröffnet Möglichkeiten der Vorbereitung auf unbekannte Stressoren und nichtlineares Verhalten komplexer Systeme. Folglich ist eine vergleichende Bewertung der Resilienz für die Ausgestaltung und Umsetzung resilienter Energiesysteme von zentraler Bedeutung. Zu diesem Zweck wurden ausgewählte resilienzsteigernde Strukturen und Funktionalitäten (Diversität, Redundanz, lose Kopplungen), die einen Vergleich des Resilienzgrades verschiedener Wärmeversorgungsszenarien ermöglichen, anhand von Bewertungsindikatoren erfasst und gegenübergestellt.

Die Analyse der Wärmeversorgungsszenarien zeigt auf lokaler Ebene eine deutlich eingeschränkte Verfügbarkeit erneuerbarer Wärmequellen in Stadtbezirken. Daraus ist abzuleiten, dass zukünftig ein bedeutender Anteil des Wärmebedarfs durch eine strombasierte Versorgung aus überregional erzeugtem regenerativem Strom gedeckt werden muss. Die ausgeführte Bewertung zeigt, dass die Werte für die Indikatoren Diversität sowie lose Kopplung von Fernwärmesystemen durch Anstrengungen zur Defossilisierung abnehmen. Im Gegensatz dazu nimmt die Redundanz entsprechender Systeme zu, da eine höhere installierte Leistung erwartet wird, die auf eine Vielzahl kleiner dezentraler Einheiten verteilt ist.

**Schlagnworte:** Resilienz, Wärmeversorgung, Fernwärme, Diversität, Redundanz, Lose Kopplung, Indikatoren-basierte Bewertung

**Abstract**

The energy transition from a fossil-based to a renewable sector-coupled energy system implies serious structural upheavals and uncertainties. Resilience, as a guiding concept for this transformation process, offers an approach to handle uncertain and unknown stressors as well as non-linear behavior of complex systems. Thus, a comparative assessment of the resilience of different future energy concepts is important in order to provide a basis for decision making and implementation of resilient energy systems. For this, certain resilience enhancing structures and functionalities (diversity, redundancy, loose couplings) were assessed by operational rating indices in order to enable a comparison of the degree of resilience of different heat supply scenarios.

The analysis of the heat supply scenarios shows that local renewable heat sources are limited in urban districts. Hence, the majority of heat demand in future heat supply scenarios must be satisfied by electricity-based supply options fed by supra-regional renewable electricity. The assessment has shown that the values of the attributes diversity and loose couplings are decreasing due to a decarbonized changing of the local district energy system. In contrast, the redundancy in the system is increasing because of a higher installed capacity spread over a multitude of smaller decentralized renewable units.

**Keywords:** resilience, heat supply, district heating, diversity, redundancy, loose couplings, indicator based assessment

**Formelzeichen**

$A$	Eigenversorgungsgrad
$D$	Disparitätsvektor
$E$	Wärmeenergie
$L$	Anteil der losen Kopplungen
$P$	Wärmeleistung
$R$	Risiko
$S$	Stirling-Index
$b$	Orthonormalbasisvektor
$d$	Disparitätsdistanz
$g$	Gewichtungsfaktor
$p$	Anteil der Kategorie bzw. Spezies
$w$	Eintrittswahrscheinlichkeit
$x$	Eigenschaftsvektor
$\alpha$	Exponent zur Gewichtung der Disparität
$\beta$	Exponent zur Gewichtung der Vielfalt und Ausgewogenheit
$\tau$	Periodenlänge

**Abkürzungen**

BHKW	Blockheizkraftwerk
DDoS	Distributed-Denial-of-Service
FW	Fernwärme
FWVS	Fernwärmeversorgungssystem
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LWH	Lokale Wärme hoch
LWM	Lokale Wärme mittel
LWPV	Lokale Wärme und Photovoltaik
NT	Niedertemperatur
PtH	Direktelektrische Wärmeerzeugung nach dem Widerstandsprinzip ( <i>Power-to-Heat</i> )
PV	Photovoltaik
ST	Solarthermie
WP	Wärmepumpe

## **1 Einleitung**

Energiesysteme unterliegen als sozio-technische Systeme fortlaufenden Veränderungen. Diese Veränderungen sind nicht allein durch technische Innovationen getrieben, sondern sind vermehrt die Konsequenz aus veränderten ökologischen, ökonomischen und sozialen Rahmenbedingungen. Somit sollte die Transformation des Energiesystems nie isoliert betrachtet werden, sondern immer nur im Zusammenhang mit seinen Wechselwirkungen mit dem übergeordneten gesellschaftlichen System (Hake und Rath-Nagel 2015). Dabei können die systemverändernden Faktoren oder Ereignisse unterschiedlicher Natur sein. Zum Beispiel können technologische oder politische Disruptionen, wie der Ausstieg aus der Kernenergie oder das Pariser Klimaabkommen, zu einem akuten Handlungsbedarf bei der Neuorientierung des Energiesystems führen. Zum anderen können schleichende Transformationsprozesse die Struktur des Energiesystems nachhaltig ändern, wie z. B. der Wechsel des Verhältnisses von Ressourcenangebot und -nachfrage, der Anstieg von Extremwetterereignissen oder die fortlaufend steigende Vernetzung von Systemelementen untereinander. Besonders die Umstellung der Versorgung auf vorwiegend fluktuierende erneuerbare Energiequellen mit einer Vielzahl dezentraler Anlagen führt zu drastischen Veränderungen in der Energieinfrastruktur. Diese Veränderungen führen zu neuen Herausforderungen.

Neben den Kernfragen des Umweltschutzes und der sozialen Verträglichkeit bei der Transformation der Energieversorgung nimmt vermehrt die Risikovorsorge und in diesem Sinne das Thema der Resilienz eine zentrale Rolle ein. Ziel dieses Beitrags ist es, eine prospektive Bewertung der Resilienz von zukünftigen Wärmeversorgungskonzepten vorzunehmen. Dazu gibt der erste Abschnitt einen Überblick über die Verwundbarkeiten (Vulnerabilitäten) von Fernwärmeversorgungssystemen. Im Anschluss wird die Notwendigkeit von resilienten Energiesystemen erläutert und eine Indikatoren-basierte Operationalisierung wichtiger Resilienz steigernder Design-Prinzipien eingeführt. Zuletzt werden die Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die betrachteten Gebiete Nord-Neukölln und Klausenerplatz vorgestellt. Dabei gibt dieser Beitrag eine umfassende Einführung in die in (Mitzinger et al. 2020) vorgestellte Methodik und fasst die Ergebnisse für zwei urbane Modellgebiete aus (Dunkelberg et al. 2020a) und (Dunkelberg et al. 2020b) zusammen.

## **2 Vulnerabilitäten der Fernwärmeversorgung**

Die Wärmeversorgung ist eine kritische Infrastruktur (Dolle und Hoff 2015) und von großer Bedeutung zur Befriedung menschlicher Grundbedürfnisse, wie Warmwasser und Heizung. Im Zuge der Dekarbonisierung und der einhergehenden Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Mobilität, sowie deren Digitalisierung entstehen möglicherweise neue Risiken für ein sicheres Energiesystem. Dieser Abschnitt fasst gegenwärtige bekannte Stressoren (=Gefährdungen) für eine Fernwärmeversorgung zusammen und leitet anschließend mögliche zukünftige Stressoren durch die Systemtransformation hin zu einem mit erneuerbaren Energien versorgten Fernwärmesystem ab.

Ausgangspunkt zur Bewertung der Vulnerabilität von Energiesystemen ist die Definition der assoziierten Systemleistungen, welche klassischerweise auf Basis technischer Parameter vorgenommen wird. Vereinfacht dargestellt wird die stabile Bereitstellung von Wärme als Systemleistung der inneren Resilienz eines Wärmeversorgungssystems bezeichnet. Die Erbringung von Systemleistungen in Form eines

systemdienlichen Betriebs für den Stromsektor ist der äußeren Resilienz eines Wärmeversorgungssystems zuzurechnen. Grundsätzlich führt eine kurze Unterbrechung der Fernwärmeversorgung von drei bis fünf Stunden durch die Speicherwirkung der Gebäude und des Fernwärmenetzes zu keinem Komfortverlust beim Kunden (AGFW 2018). Alle Schwachstellen, die die Sicherstellung der Systemleistung gefährden, werden als Vulnerabilität bezeichnet und nachfolgend näher erläutert.

Dieser Abschnitt gibt eine Auswahl wichtiger Vulnerabilitäten der Fernwärmeversorgung wieder, um diese bei zukünftigen Versorgungskonzepten zu berücksichtigen. Im Hinblick auf das Fernwärmeversorgungssystem (FWVS) bestehend aus der Leitwarte, dem Fernwärmenetz und den Pumpenstationen unterteilt die AGFW (AGFW 2018) die Gefährdungen von FWVS in zwei Gruppen: IT-relevante Gefährdungen und Gefährdungen ohne IT-Bezug. Als IT-relevante Gefährdungen werden vom AGFW 25 Gefährdungen, wie etwa die Unterbrechung der Stromversorgung, die Einbringung von Schadcode und die physikalische Beeinträchtigung durch Naturgefahren, genannt. Die Gefährdungen ohne IT-Bezug betreffen die Pumpenstationen und die Fernwärmeverteilung (AGFW 2018). Gefährdungen sind zum Beispiel ein Ausfall oder Störung von Pumpen oder eine Leckage in den Fernwärmeleitungen. Eine Leckage kann durch Beschädigungen der Fernwärmeleitungen wie korrosionsbedingte Risse in den Rohren verursacht werden. Neben dem FWVS müssen die Wärmeerzeugung und die Wärmetübergabestationen der Abnehmer/innen funktionieren. Eine detaillierte Beschreibung einzelner Gefährdungen findet sich u.a. in (Rimkevicius et al. 2012) und (Tereshchenko und Nord 2016).

Weitere Vulnerabilitäten, die das Übertragungssystem betreffen, sind externe Störungen wie das menschliche Handeln oder Fehler bei der Reparatur. Menschliches Handeln wird im Falle eines Fehlers bei der Verwaltung von technologischen Prozessen als Störung angesehen (Rimkevicius et al. 2012). Der Hauptteil aller Störungen geht mit 30 % bis 40 % zurück auf Korrosion von Rohrleitungen, die zur Intensivierung verschiedener Bruchmechanismen führt (Rimkevicius et al. 2012). Weite Teile des Rohrleitungssystems sind vergraben, wodurch sich Brüche und Leckagen schwer lokalisieren lassen (Tereshchenko und Nord 2016). Valincius et al. (Valincius et al. 2015) zeigen in ihren Arbeiten, dass Defekte an Rohrleitungen größtenteils an der Schweißnaht auftreten. Nach Wirths (Wirths 2008) kann eine weitere Ursache für Fehler in Fernwärmesystemen eine zu hohe Rücklauftemperatur sein, die durch defekte Regelventile, undichte Kurzschlussleitungen, eine fehlerhaft eingestellte Außentemperaturabhängige Regelung oder eine unzureichende Wärmedämmung hervorgerufen werden kann. Nicht zuletzt ist die Qualität der eingesetzten Technologien und Komponenten ein wichtiger Faktor, der die Vulnerabilität eines FWVS beeinflusst. Ein guter Zustand von Vorrichtungen, insbesondere von Ventilen und eine hohe Qualität der Rohre können die Fehlerrate in Fernwärmenetzen maßgeblich senken, wie eine Analyse des Warschauer Fernwärmenetzes durch Gilski et al. (Gilski et al. 2014) zeigt.

Als Beispiele für Cyberangriffe auf Wärmesysteme sind folgende Fälle zu nennen: Zum einen fiel mehrere Monate lang ein Steuerungscomputer des Heizungssystems von mehreren Wohneinheiten in der ostfinnischen Stadt Lappeenranta aus, ausgelöst durch *Distributed-Denial-of-Service* (DDoS) Angriffe. Dabei reagierten die Steuerungscomputer auf jeden Angriff mit einem Neustart. Sobald das System wieder online war, begannen die Attacken erneut, sodass dies in einen Angriff-Neustart-Angriff Kreislauf resultierte. Der Vorfall ereignete sich im Zeitraum Oktober bis November 2016. In der Region ist zu dieser Jahreszeit mit zweistelligen Minustemperaturen zu rechnen, was die Kritikalität verdeutlicht. Die Verwundbarkeit resultierte in diesem Beispiel aus dem Anschließen der Heizungsanlage an das Internet, um Fernwartungen zu ermöglichen (Jung 2017). Ein anderer Angriff wurde im Jahr 2016 von den Sicherheitsexperten Andrew Tierney und Ken Munro im Kontext der Hacker-Konferenz *Def Con* in Las Vegas vorgestellt. Auf Basis einer Sicherheitslücke in einem Thermostat wurde dieses mit



Ransomware infiziert. Die Hacker erlangten die Kontrolle über das Thermostat und sperrten für den Besitzer sämtliche Funktionen. Über das Thermostatdisplay wurde die Zahlung von Bitcoins verlangt und bis zum Zahlungseingang eine Anpassung der Raumtemperatur auf ein unbehagliches Niveau angedroht (Briegleb 2016).

In Bezug auf die eingesetzten Rohstoffe ist in der Fernwärme grundsätzlich eine Abkehr von fossilen Rohstoffen, die einen hohen CO<sub>2</sub>-Beitrag bei deren Verbrennung aufweisen, wie Kohle und Heizöl, zu beobachten. In den meisten Fällen wird Gas als Substitut verwendet, was die Abhängigkeit von diesem Rohstoff und den Ursprungsländern erhöht. Dies stellt eine potenzielle Schwachstelle dar, wenn nicht der Gas-Bezug und die Gewinnungsart, z. B. durch synthetisches Gas diversifiziert wird.

Durch den angestrebten langwierigen Transformationsprozess des Energiesystems hin zu einem von erneuerbaren Energien versorgten System ergeben sich weitere noch nicht im Detail absehbare strukturelle Änderungen des Gesamtsystems. Die folgende Liste zeigt beispielhaft mögliche Entwicklungen und Herausforderungen für die Fernwärmeversorgung:

- Regenerative und CO<sub>2</sub>-arme Wärmequellen (Solarthermie, Abwärme, Ab- und Flusswasserwärme) müssen in bestehende Fernwärmeversorgungssysteme integriert werden.
- Die Erschließung von im Stadtquartier verteilten Abwärme-Quellen erfordert die Errichtung von dezentralen Wärme-Einspeisepunkten. Dies steigert den Gesamtkoordinationsaufwand.
- Die Betriebstemperaturen werden abgesenkt, insofern es die Haustechnik der angeschlossenen Objekte zulässt. Dies könnte zu einer Verringerung der Temperaturspreizung und damit bei gleichbleibendem Leistungsbedarf (beispielsweise durch eine Erhöhung der Anschlussquote) zu hydraulischen Problemen führen.
- Der Anteil der Strom-basierten Wärmeerzeugern (Wärmepumpen und *Power-to-Heat*<sup>1</sup> (PtH)), erhöht sich und neue Technologien werden zur Wärmeerzeugung eingesetzt (z. B. Brennstoffzelle, Wasserstoff-Blockheizkraftwerk (BHKW), etc.).
- Bestehende und zukünftige Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) müssen sowohl den Wärmebedarf des Fernwärmenetzes sicherstellen und gleichzeitig auf den Strommarkt reagieren können. Dies bedeutet eine hohe Flexibilitätsanforderung an die Anlagen.
- Der Ausbau und die Integration von thermischen Speichern wird erforderlich.
- Der Betrieb und die Regelung der Anlagen werden durch die Sektorenkopplung nicht nur vom Wärmeversorgungssystem, sondern auch von weiteren Faktoren, wie der Verfügbarkeit von Wind- und Solarstrom abhängig sein. Eine Wetterprognose mit hoher Prognosegüte ist dabei von hoher Bedeutung.
- Möglicherweise werden dezentrale Wärmeerzeuger zur Temperaturanhebung und zur Sicherstellung der Wärmeversorgung in Teilsträngen mit hohen Temperaturanforderungen installiert.
- Das Fernwärmenetz könnte als Plattform dienen, in die verschiedene dezentrale Akteure einspeisen und ihre Wärme verkaufen.
- Es bestehen hohe Verwundbarkeiten auf regulatorischer Ebene – Wie können unter fluktuierenden politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sichere und nachhaltige Investitionsentscheidungen getroffen werden?

---

<sup>1</sup> Mit *Power-to-Heat* werden in dieser Arbeit alle Art von direktelektrischer Wärmeerzeugung nach dem Widerstandsprinzip bezeichnet. Dazu zählen Elektrodenkessel, Heizstäbe und Widerstandsheizungen.

Auch wenn die genauen Systemveränderungen schwer vorherzusehen sind, ist in Summe von einer Steigerung der Komplexität des Betriebs und der Regelung der Anlagen und einer engeren Verzahnung sowie Erhöhung des Informationsaustausches mit anderen Sektoren und Akteuren auszugehen.

Die hier angestellte Betrachtung ausgewählter Vulnerabilitäten fokussierte auf bekannte gegenwärtige und zukünftige Gefährdungen. Neben den genannten zukünftigen Risiken entstehen im Zuge der Transformation des Energiesystems möglicherweise auch noch zum jetzigen Zeitpunkt unbekannte Gefährdungen. Der einzige uns bisher bekannte Ansatz zur Vorbereitung eines Systems auf völlige Überraschungen, auf sogenannte *unknown unknowns*, also unvorhergesehene und völlig unbekannte Gefährdungen ist die Gestaltung eines Systems gemäß dem Leitkonzept der Resilienz. In den folgenden Abschnitten werden das Leitprinzip der Resilienz und eine Methodik zur Bewertung anhand verschiedener Gestaltungsprinzipien vorgestellt.

### 3 Methodik der Resilienzbewertung

Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Systems, seine Leistungsfähigkeit auch unter Stress und unter turbulenten Bedingungen aufrechtzuerhalten (Gleich et al. 2010). Ein resilientes Energiesystem liefert zuverlässig Energie für die verschiedenen nachgefragten Dienstleistungen wie Licht, Wärme und Fahrzeugantrieb, selbst wenn äußere Störungen oder innere Ausfälle das System belasten. Resiliente Energiesysteme sind vom Design her besonders gut auf Überraschungen und Unvorhergesehenes vorbereitet und reagieren adäquat auf Störungen. Das Gestaltungsleitbild „Resilienz“ kann durch Designprinzipien konkretisiert werden. Mit Hilfe dieser Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten lässt sich überprüfen inwiefern ihre Implementation die Resilienz im Zuge der Transformation des Energiesystems verändert. Diese Designprinzipien sind abgeleitet aus Erfahrungswerten aus evolutionär erprobten Ökosystemen (Biomimetik vgl. (Gleich und Giese 2019)), aus dem vorsorgeorientierten Risikomanagement und aus bewährten Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen (Brand et al. 2017). Ihre Berücksichtigung fördert und gestaltet auf vielfältige Art und Weise die Widerstands-, Anpassungs-, Innovations- und Improvisationsfähigkeit der betreffenden Systeme. Im Folgenden wird eine indikatorbasierte Bewertungsmethode für vier Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten, Diversität, Redundanz, lose und optionale Kopplungen sowie Subsidiarität dargestellt. Die technische und wirtschaftliche Ausrichtung des Projektrahmens und die daraus resultierende Datenbasis ermöglichte lediglich die Entwicklung einer Bewertungsmethodik für die genannten Designprinzipien. Designprinzipien, die eine soziologische Datenbasis erfordern, wurden daher nicht berücksichtigt.

Die Anwendung von Resilienz als Leitkonzept wirft die Frage auf, ob beziehungsweise inwieweit die Resilienz soziotechnischer Systeme durch die Implementierung von bestimmten Strukturen und Funktionalitäten tatsächlich gesteigert werden kann. Diese Frage wird in (Gleich et al. 2010) ausführlicher diskutiert und in Bezug auf die Gestaltbarkeit von systemdefinierenden Strukturen, Elementen und Funktionen positiv beantwortet.

Im Rahmen des Forschungsprojekts Urbane Wärmewende Berlin wurde die Resilienz zukünftiger Wärmeversorgungskonzepte zweier Berliner Stadtteile untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten, Diversität, Redundanz, lose und optionale Kopplungen und Subsidiarität, anhand von operationalisierten Indikatoren bewertet, um einen Vergleich der Resilienz verschiedener Wärmeversorgungsszenarien zu ermöglichen. Weitere Informationen zur angewendeten Methodik sind in (Mitzinger et al. 2020) zu finden.

### 3.1 Definition der Resilienz

Um eine erfolgreiche Transformation von urbanen Bezirken hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung zu gewährleisten, muss eine Vielzahl an lokalen erneuerbaren Quellen erschlossen und in die Wärmeinfrastruktur eingebunden werden. Dies erfordert ein hohes Maß an Digitalisierung und Automatisierung der zugrundeliegenden Infrastruktur. Je komplexer und automatisierter das Energiesystem wird, je mehr es auf wetter- und tageszeitlich-abhängigen Energiequellen basiert und je mehr es mit politischen und sozialen Rahmenbedingungen verflochten ist, desto weniger sind etablierte Mechanismen in der Lage, die Systemsicherheit aufrechtzuerhalten. Folglich steigt die Anfälligkeit für intrinsische Stör- und Ausfälle, cyber-physikalische Angriffe und andere bekannte und unbekannte Stressoren (Fischer und Lehnhoff 2019). Stressoren können nach ihren Merkmalen Dynamik und Bekanntheitsgrad unterschieden werden. Dies bedeutet, dass sie entweder schleichend oder abrupt auftreten können, sowie bereits bekannt oder völlig unbekannt sein können. Abhängig von der Dynamik und dem Bekanntheitsgrad des Stressors können unterschiedliche Fähigkeiten des betroffenen Systems (Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit, Innovationsfähigkeit und Lernfähigkeit) die Wirkungen des Stressors mildern oder ganz verhindern (Gößling-Reisemann 2017).

Vorsorge orientiertes Risikomanagement sollte einem präventiven Bottom-up-Prinzip folgen, indem das Verhalten von Systemen untersucht wird, die mit bekannten und erwarteten Stressoren konfrontiert sind, um Schwachstellen zu lokalisieren und zu beheben (*fail-safe*) (Linkov et al. 2014). Dieser ereignisbasierte Ansatz weist jedoch einige Schwachstellen auf. Einerseits ist dieser Zugang zur Systemsicherheit nur auf die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Systems ausgerichtet, während andere Resilienz steigernde Systemfähigkeiten vernachlässigt werden. Andererseits werden mögliche unvorhersehbare und unbekannte Stressfaktoren (sogenannte *unknown unknowns*) nicht berücksichtigt. Durch das Risikomanagement kann das System daher nur präventiv und adaptiv vor identifizierten Stressfaktoren geschützt werden. Wenn es dennoch zu einer Abnahme der Systemleistung kommt, sind weitere Routinen erforderlich, um die Intensität und Dauer der Störung zu verringern und die Systemleistung wiederherzustellen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird ein Ansatz zur Resilienz eingeführt, der sich dem Resilienzbegriff, der in der Ökosystemtheorie verwendet wird, anlehnt. Darüber hinaus gehend wird Resilienz nicht nur als Systemfähigkeit interpretiert, sondern dient als Leitkonzept für die Gestaltung von Systemen. Die Hypothese, auf der dieser biomimetische Ansatz basiert, lautet, dass das erfolgreiche Überleben biotischer Systeme auch unter sich ändernden und vorübergehend turbulenten Rahmenbedingungen auf identifizierbaren Strukturen und Funktionalitäten beruht. Diese Strukturen und Funktionalitäten sind das Ergebnis eines Optimierungsprozesses von Mutation, Rekombination und Selektion, über Millionen von Jahren, die es dem System ermöglichen, auch auf völlig unbekannten und unerwartete Stressoren vorbereitet zu sein (Holling 1973; Gleich et al. 2010; Brand et al. 2017). Im Leitkonzept Resiliente Systeme werden diese Strukturen und Funktionalitäten aus biotischen Systemen in Designprinzipien für die Gestaltung sozio-technischer Systeme überführt (Gleich et al. 2010).

Resilienz als Leitkonzept für die Gestaltung von Systemen befasst sich daher nicht nur mit der Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Systems zur Vermeidung von Störereignissen, sondern berücksichtigt auch die Fähigkeit zur Improvisation und nicht zuletzt zur Innovation um (z. B. durch einen Umbau des Systems) dem Störereignis entgegenzuwirken. Bisher wurden die folgenden Strukturen und Funktionen identifiziert, die diese Systemfähigkeiten verbessern und damit die Resilienz eines Systems steigern: Ressourcenverfügbarkeit, Diversität, Redundanz, lose Kopplungen, Dämpfer-Puffer-Speicher,

Modularität und Multifunktionalität, Subsidiarität, Handlungsfähige und -bereite Akteure, Effizienz, Zellularität (Gleich et al. 2010; Brand et al. 2017).

Um eine Grundlage für die Entscheidungsfindung für Transformationspfade hin zu resilienteren Energiesystemen zu schaffen, ist eine Bewertung der Resilienz zukünftiger Energiekonzepte zusätzlich zu den bestehenden Methoden der Risikobewertung wichtig. Im Folgenden wird eine indikatorbasierte Methode für die Bewertung der Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten, Diversität, Redundanz, lose Kopplungen, sowie Subsidiarität vorgestellt.

### 3.2 Diversität

Die Diversität eines Systems wird nach (Stirling 2007) durch drei Elemente beschrieben: Varietät (Anzahl an Optionskategorien im System), Balance (Verteilung der Systemelemente über die Optionskategorien) und Disparität (Verschiedenheit der Optionskategorien zueinander). Diversität trägt aufgrund der zugrundeliegenden Vielfalt zur evolutionären Innovationsfähigkeit von Systemen bei (Peterson et al. 1998; Molyneaux et al. 2016). Des Weiteren ist die Optionenvielfalt eines Systems hilfreich, um Pfadabhängigkeiten zu vermeiden (Farrell et al. 2004). Nach Lovins und Lovins (Lovins und Lovins 1982) ist die Dispersion, also die räumliche Verteilung von Systemkomponenten ebenfalls ein relevanter Faktor der Diversität. Funktionelle und strukturelle Diversität wird durch eine entsprechende Auswahl und Anordnung von Erzeugungs-, Konversions-, Speicher-, Verteilungs-, Steuerungs-, und Kommunikationstechnologien sowie der dazugehörigen Ressourcen erreicht. Zur Quantifizierung der Diversität sind Bewertungsmethoden wie der Shannon-, Gini- oder Stirling-Index etabliert (Stirling 2010; Binder et al. 2017). Es wurde hier der Stirling-Index als Quantifizierungsmetrik ausgewählt, da dieser sowohl die Vielfalt der Kategorien in einem System, die Ausgewogenheit der Verteilung der Elemente zwischen den verschiedenen Kategorien als auch die Disparität, das heißt die Unähnlichkeit zwischen den Kategorien, berücksichtigt (Stirling 2010). Der Stirling-Index  $S$  ist definiert als:

$$S = \sum_{ij(i \neq j)} d_{ij}^{\alpha} \cdot (p_i \cdot p_j)^{\beta}. \quad (1)$$

mit

$d_{ij}$ : Disparitätsdistanz zwischen Optionskategorie  $i$  &  $j$

$p_i$ : Anteil von Optionskategorie  $i$  an der bereitgestellten Jahresenergiemenge

$\alpha$ : Gewichtungsfaktor Disparität

$\beta$ : Gewichtungsfaktor Varietät und Balance

Der Stirling-Index  $S$  berechnet sich aus der Summe des paarweisen Vergleichs der einzelnen Komponenten  $i$  und  $j$ . Die Komponenten sind dabei die einzelnen Anlagentypen eines Wärmeversorgungsszenarios zur Wärmeerzeugung. Dabei stellen  $p_i$  und  $p_j$  die Anteile der einzelnen Wärmeerzeuger an der gesamten Wärmebereitstellung eines Jahres dar. Der erste Multiplikand  $d_{ij}$  entspricht der Disparitätsdistanz zwischen den beiden Wärmeerzeugern, während der zweite Multiplikand aus  $p_i \cdot p_j$  die Varietät der Kategorien und die Balance der Verteilung repräsentiert. Mit den Exponenten  $\alpha$  und  $\beta$  ist es möglich, die Disparität sowie die Varietät und Balance spezifisch zu gewichten. Bei einer Vernachlässigung

der Disparität ( $\alpha = 0$ ) entspricht das Ergebnis des Stirling-Indexes dem des halben Gini-Indexes. Die Disparitätsdistanz  $d_{ij}$  wird wie folgt berechnet:

$$d_{ij} = \frac{\|D_L D_L^{-1} g_L\|_1}{\|g\|_1} \quad (2)$$

und

$$D = \sum_k^n b_k^T (x_i - x_j) b_k b_k^T. \quad (3)$$

mit

- $x_i, x_j$ : Eigenschaftsvektor der Optionskategorie  $i$  bzw.  $j$
- $D$ : Diagonalmatrix aus dem Differenzvektor  $(x_i - x_j) \mid D \in K^{n \times n}$
- $D_L$ : Untermatrix von  $D \mid D_L \in K^{r \times r}$
- $r$ : Rang der Matrix  $D \mid r = \text{rang}(D)$
- $n$ : Anzahl von Attributkategorien  $\mid n = \dim(x_i, x_j)$
- $b_k$ :  $k$ ter Orthonormalbasisvektor des  $n$ -dimensionalen Vektorraums  $\mid b_k \in K^n$
- $g$ : Gewichtungsvektor  $\mid g \in K^n$
- $g_L$ : Gewichtungsvektor reduziert auf die Dimension  $r \mid g_L \in K^r$

$D$  stellt dabei die Disparitätsmatrix dar. Die Dimension der Disparitätsmatrix entspricht der Anzahl der Attribute mit Hilfe derer die Wärmeerzeugertechnologien unterschieden werden. Der Vektor  $g$  gibt die Gewichtung der Attribute an. Der Index  $L$  steht für die reduzierte Form der Disparitätsmatrix und des Gewichtungsvektors. Bei dieser Operation wird die Matrix bzw. der Vektor um Nullspalten bzw. -zeilen gekürzt, sodass die Disparitätsmatrix für die weiteren mathematischen Operationen vollen Rang besitzt.

In der Bewertung dieser Arbeit wurden die Unterschiedlichkeit der Wärmeerzeugertechnologien anhand der in Tabelle 1 gelisteten Attribute vorgenommen. Die einzelnen Attribute wurden hinsichtlich ihres Beitrags zur Verschiedenheit gleich gewichtet.

Tabelle 1: Attribute von Wärmeerzeugertechnologien und deren Ausprägungen als Grundlage für die Bewertung anhand von Indikatoren.

Ressourcenbasis	Infrastrukturabhängigkeit	Brennstoff	Technologiekategorie	Technologieart
Fossil	Netz-/Leitungsgebunden	Gas	KWK	Gasturbine
Regenerativ	Netz-/Leitungsunabhängig	Öl/Benzin	Kessel	Gasmotor
Gemischt		Kohle	Wärmepumpe	Gas- und Dampf Kraftwerk
		Solar	Solarthermie	Niedertemperatur
		Synthetisches Gas	Wärmeübertrager	Brennwert
		Biogas	Power-to-Heat	Brennstoffzelle
		Biomasse	Photovoltaik	Heizkraftwerk

Ressourcenbasis	Infrastrukturabhängigkeit	Brennstoff	Technologiekategorie	Technologieart
		Geothermie		Außenluft-Wärmepumpe
		Netzstrom		Flusswasserwärmepumpe
		PV-Strom		Abwasser-Wärmepumpe
		KWK-Strom		Geothermalwärmepumpe
		Abwärme		Flachkollektoren
		Fernwärme		Vakuumröhrenkollektoren
				Wärmeübertrager
				Elektrodenkessel
				Dünnschichtzellen
				Abwärme-Wärmepumpe

### 3.3 Redundanz

Unter Redundanz versteht man die Dopplung oder das mehrfache Vorhandensein von gleichartigen Systemkomponenten. Bei Ausfall einer Komponente wird der Betrieb nicht beeinträchtigt, wenn eine andere Komponente die Funktion wirksam substituiert (n-1 Kriterium) (Biggs et al. 2012). Somit wirkt physische Redundanz widerstandserhöhend gegenüber einem (Stör-)Ereignis und fördert in erster Linie die Resilienz des Systems, da selbst bei einem Ausfall einer oder mehrerer relevanter Komponenten eine stabile und sichere Systemleistung gewährleistet werden kann. Die gesicherte installierte Leistung des Systems sollte daher den maximalen prognostizierten Leistungsbedarf um einen möglichst großzügigen Faktor übertreffen, damit selbst bei Anlagenausfällen unter Spitzenlast ausreichend Back-up-Kapazitäten verfügbar sind. Zur Bewertung der Redundanz eines Systems wird eine probabilistische Risikoanalyse unter Berücksichtigung eines schrittweisen Ausfalls von Einheiten durchgeführt. Zu diesem Zweck wird das Versorgungsrisiko  $R_i$  bei fortschreitendem Ausfall von Einheiten berücksichtigt. Das Versorgungsrisiko ergibt sich aus dem Produkt des Versorgungsdefizits in der Kombination aus ausfallenden Einheiten und der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Ausfallkombination. Die folgende Gleichung beschreibt das Risiko nicht geleisteter Energie einer Ausfallkombination  $i$ :

$$R_i = w_i \cdot \sum_{\substack{t=0 \\ \Delta P_{S,t,i} < 0}}^T (|\Delta P_{S,t,i}| \cdot \tau_t), \quad (4)$$

mit

$R_i$ : Versorgungsrisiko in der Kombination  $i$

$i$ : Kombination ausgefallender Anlagen

$t$ : Zeitschritt

$T$ : Anzahl der Zeitschritte

$\tau_t$ : Periodenlänge des Zeitschritts  $t$

$\Delta P_{S,t,i}$ : fehlende Systemleistung im Zeitschritt  $t$  unter der Kombination  $i$

$I_i$ : Menge der ausgefallenen Anlagen in der Kombination  $i$

$w_i$  ist die Einzelwahrscheinlichkeit der Ausfallkombination  $i$ . Der zweite Multiplikand stellt den Energieverlust durch die geringere verfügbare Anlagenleistung dar und berechnet sich aus der Summe des Energiedefizites verursacht durch die geringere verfügbare Leistung über alle Zeitpunkte  $t$  des Betrachtungszeitraum von 0 bis  $T$ . Die Wahrscheinlichkeit der Ausfallkombination  $w_i$  resultiert aus dem Produkt der Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Anlagen:

$$w_i = \prod_{v \notin I_i} (1 - w_v) \prod_{w \in I_i} w_w. \quad (5)$$

mit

$i$ : Kombination ausgefallener Anlagen

$I_i$ : Menge der ausgefallenen Anlagen in der Kombination  $i$

$p$ : Ausfallwahrscheinlichkeit

$v$ : Element in der Menge der zur Verfügung stehenden Anlagen in der Kombination  $i$  |  $v \notin I_i$

$w$ : Element in der Menge der ausgefallenen Anlagen in der Kombination  $i$  |  $w \in I_i$

Dabei vereint die Menge  $I_i$  die ausgefallenen Anlagen der Ausfallkombination  $i$ . Die Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Anlagen werden durch  $w_v$  und  $w_w$  dargestellt. Der Index  $v$  repräsentiert dabei alle nicht ausgefallenen Anlagen und der Index  $w$  alle ausgefallenen Anlagen.

Das Gesamtrisiko  $R$  errechnet sich aus der Summe der Risiken der einzelnen Ausfallkombinationen:

$$R = \sum_{k=0}^n \sum_{i=1}^{\binom{n}{k}} R_i. \quad (6)$$

mit

$R$ : Gesamtrisiko

$R_i$ : Versorgungsrisiko in der Kombination  $i$

$n$ : Gesamtanlagenzahl

$k$ : Anzahl ausgefallender Anlagen |  $k \in \{0, \dots, n\}$

$\binom{n}{k}$ : Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten von  $k$  aus  $n$

$i$ : Kombination ausgefallender Anlagen

$R$  ist das Gesamtrisiko des Ausfalls von bis zu  $k$  Anlagen einer Gesamtzahl von  $n$  Anlagen. In jedem Schritt wird das Versorgungsrisiko für jede Kombination aus ausfallenden Einheiten berechnet und aufsummiert. Die Anzahl aller Kombinationen wird durch den Binomialkoeffizienten von  $k$  aus  $n$  Einheiten im Allgemeinen definiert. Wenn  $k$  eins ist und das Gesamtrisiko  $R$  Null ergibt, ist das  $n-1$ -Kriterium erfüllt. Dies bedeutet, dass immer noch genügend Leistung zur Verfügung steht, unabhängig davon, welche Anlage ausfällt und wann diese ausfällt.

### 3.4 Lose Kopplungen

Ein System zeichnet sich dadurch aus, dass Elemente und Komponenten miteinander verbunden bzw. gekoppelt sind. Kopplungen können als lose bezeichnet, wenn bestimmten Teilen des Systems erlaubt ist nach ihrer eigenen Logik zu funktionieren. Bei Systemen mit starren Kopplungen ist zwischen den verbundenen Teilen kein Spiel, keine Pufferzone oder Elastizität erlaubt (Perrow 2011). Im Energiesektor setzt sich zunehmend eine stärkere Kopplung unterschiedlicher Infrastrukturen, Erzeugung und Energiequellen durch – auch Sektorenkopplung genannt. Beispiele aus dem Bereich der Wärme sind Kraft-Wärme-Aggregate, wie z. B. BHKW oder Wärmepumpen. Bei beiden werden Stromnetze und Wärmeerzeugung miteinander gekoppelt, wodurch Abhängigkeiten entstehen. Grundsätzlich sind derzeit alle Wärmeerzeugungstechnologien, wenn nicht speziell ausgelegt, über die elektrische Steuerung und Regelung von einer Versorgung mit elektrischer Energie abhängig.

Beim Gestaltungsprinzip „Lose Kopplung“ wird zwischen Kopplungen unterschieden, bei denen eine Trennung vorgesehen und vorbereitet ist (lose Kopplungen) und bei denen eine Auflösung nicht vorgesehen ist (starre Kopplung) (Gößling-Reisemann und Thier 2019). Ein Vorteil loser Kopplungen ist, dass im Störfall kaskadierende Fortsetzungen von Störungen verhindert werden können. Lose Kopplungen erlauben also eine schnelle Isolierung im Schadensfall (Lovins und Lovins 1982; Gershenson et al. 2003). Die Beurteilung, ob Kopplungen lose oder starr sind, erfolgt durch eine Analyse der Abhängigkeiten von Versorgungstechnologien und zugehörigen Infrastrukturen. Leitungsgebundene Energieträger sind als starrer zu betrachten als Feststoffe, da die Verteilung und Lagerung bei letzteren loser und auf vielfältige Art und Weise erfolgen kann. Umweltwärme und Solarthermie (jahreszeitliche Erzeugungscharakteristika) in Kombination mit dezentraler Steuerung sind autark und werden als lose gekoppelt angesehen. Allerdings besteht eine starke Abhängigkeit zu den Umweltquellen. So produzieren solarthermische Anlagen an bewölkten Tag wenig oder keine Wärme und Ab- und Flusswasserwärmepumpen sind stets an die betrieblichen Bedingungen und Umwelteinflüsse ihrer Wärmequellen gekoppelt. Dieser Determinismus macht eine hohe Prognosegüte über die Verfügbarkeit der primären Wärmequellen umso wichtiger. Kann ein Wärmeerzeuger mit mehr als einer Energiequelle versorgt werden, wobei eine davon unabhängig von zusammenhängenden Infrastrukturen ist, so werden die Kopplungen als lose bezeichnet. Beispiele hierfür sind Wärmepumpen die sowohl mit Netzstrom als auch Photovoltaik (PV) oder BHKW erzeugtem Strom versorgt werden. Ausschlaggebend für die Kopplung eines Systems ist die Anzahl der möglichen Optionen des Systems. Beispielsweise kann die Brennkammer eines Kohlekessels üblicherweise auch mit Biomasse oder anderen brennbaren Quellen befeuert werden. Denkbar wären mobile Gasbrenner um den Kessel zu erhitzen oder aber ein ölbetriebener Brenner. Mit diesen Lösungen können starre Kopplungen zum Erdgasnetz loser gestaltet werden.

Als Indikator für die Bewertung dient das Verhältnis  $L$  der durch lose gekoppelte Anlagen bereitgestellter Wärmeenergie  $E_i$  an der gesamten Jahreswärmeenergiebereitstellung  $E_{ges}$ . Als lose gekoppelte Anlagen gelten Kessel betrieben mit Kohle, Biomasse oder Öl, Solarthermie und Wärmepumpen, die an Photovoltaikanlagen, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und das Stromnetz angeschlossen sind.



$$L = \sum_i \frac{E_i}{E_{ges}}. \quad (7)$$

mit

$L$ : Anteil bereitgestellter Wärmeenergie durch lose gekoppelte Anlagen

$E_i$ : bereitgestellte Wärmeenergie durch lose gekoppelte Anlagen

$E_{ges}$ : Jahreswärmeenergiebereitstellung

### 3.5 Subsidiarität

Subsidiarität beschreibt die Gestaltung von Hierarchien in einem System, bei der Elemente der unteren Organisationsebenen möglichst weitgehend ohne Rückgriff auf Entscheidungen oder Leistungen übergeordneter Ebenen auskommen können. Als förderlich für Subsidiarität wird eine polyzentrische Führung angesehen (Ostrom 2010). Durch die Berücksichtigung des Prinzips der Subsidiarität bei der Gestaltung von Systemen wird ein stärkerer Fokus auf dezentrale Strukturen gelegt.

Als Operationalisierung kann der Eigenversorgungsgrad auf Basis von lokalen Ressourcen dienen und als Indikator für die Subsidiarität angewendet werden. Auch wenn der Eigenversorgungsgrad nur einen Teil der Aspekte von Subsidiarität widerspiegelt, so kann dieser dennoch ein Indiz für die Erfüllung des Designprinzips der Subsidiarität gelten. Der Eigenversorgungsgrad  $A$  ist das Verhältnis der Wärmeenergiemengen  $E_i$ , die im Betrachtungsgebiet selbst erzeugt werden können, zum gesamten Jahreswärmeenergiebereitstellung  $E_{ges}$  des Fernwärmeversorgungssystems:

$$A = \sum_i \frac{E_i}{E_{ges}}. \quad (8)$$

mit

$A$ : Eigenversorgungsgrad

$E_i$ : bereitgestellte Wärmeenergie aus lokalen Ressourcen

$E_{ges}$ : Jahreswärmeenergiebereitstellung

Als Eigenerzeugung sind lokale Erzeuger aus erneuerbaren Energien berücksichtigt. Dies sind Solarthermie und die Wärmemengenanteile von Wärmepumpen, die mit Photovoltaikstrom gespeist werden. Ab- und Flusswasserwärme gelten hier nicht als lokale Ressourcen, da sie Strom zum Betrieb benötigen, um die Wärme auf ein nutzbares Niveau zu bringen. Der Strom der BHKW wird komplett eingespeist und steht nicht für den Betrieb von Wärmepumpen zur Verfügung. Die BHKW werden zudem durch Erdgas, also durch eine nichtlokale Ressource, angetrieben.

## 4 Beschreibung der Stadtgebiete und Wärmeversorgungskonzepte

Im Forschungsprojekt Urbane Wärmewende Berlin wurde die indikatorbasierte Bewertungsmethode auf Fallstudien zweier Stadtgebiete in Berlin angewendet. Das Projekt Urbane Wärmewende verfolgt das Leitbild einer städtischen Wärmeversorgung, die umwelt- und sozialverträglich sowie intelligent mit

anderen Infrastrukturen vernetzt ist. Denn eine zukunftsfähige Wärmeversorgung muss nicht nur den Klimaschutzziele gerecht werden, sie muss bezahlbar sein und die CO<sub>2</sub>-Reduktion sollte möglichst kosteneffizient erzielt werden. Für die Untersuchungsgebiete fanden Bestandsanalysen zu den Potenzialen an erneuerbaren Energien und Abwärme statt sowie zu den Möglichkeiten und Restriktionen in Bezug auf die energetische Sanierung des Gebäudebestands. Die Abschnitte 4.1.1 und 4.2.1 stellen die beiden Stadtgebiete vor. Auf Basis der Bestandsanalyse wurden für die Verbraucher- und die Erzeugerseite Wärmeversorgungsoptionen mit einem Simulationstool modelliert, um energietechnische Kennwerte zu ermitteln. Weitere Informationen zu den Gebieten, ihrer Bestands- und Potentialanalyse, zum Simulationstool sowie zur ökonomischen und ökologischen Bewertung finden sich in (Dunkelberg et al. 2020a) und (Dunkelberg et al. 2020b). Der Output aus dem Modell ging als Input für die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse der Resilienz-Bewertung ein, und wird in den Abschnitten 4.1.2 und 4.2.2 näher beschrieben.

## **4.1 Nord-Neukölln**

### *4.1.1 Hintergrund*

In Nord-Neukölln befasste sich das Projekt Urbane Wärmewende mit dem Thema Transformation der Fernwärme. Im Untersuchungsgebiet beziehen sehr viele Wohn- und Nichtwohngebäude Fernwärme. Die über Fernwärme bereitgestellte Wärme wird aktuell teilweise aus dem Berliner Verbundnetz bezogen und teilweise in eigenen Anlagen erzeugt. Eingesetzte Brennstoffe sind Erdgas, Biomasse, Steinkohle, sowie geringfügige Mengen Öl für die Spitzenlast. Eine Power-to-Heat-Anlage (PtH) ermöglicht perspektivisch die flexible Wärmeproduktion in Abhängigkeit von Schwankungen in der erneuerbaren Stromproduktion.

Wichtige Transformationsaufgaben für die Fernwärme im Zeitraum bis 2030 sind der Ausstieg aus der Steinkohlenutzung und die Umstellung des Kraftwerkparcs auf regenerative und CO<sub>2</sub>-arme Energieträger und Erzeugungsanlagen. Im Projekt Urbane Wärmewende wurden die Potenziale an erneuerbaren Energien und Abwärme im Versorgungsgebiet quantifiziert und sozial-ökologische Synergien und Konfliktpotenziale identifiziert. Aufbauend auf dieser Datengrundlage wurden unterschiedliche Entwicklungsmöglichkeiten des Erzeugerparcs konzeptioniert, modelliert und ökonomisch und ökologisch sowie in Hinblick auf die Resilienz bewertet. Für die Verbraucherseite wurden verschiedene Sanierungsszenarien entwickelt, die unterschiedlich hohe Sanierungsraten und -tiefen berücksichtigen. Eine Besonderheit des Gebietes liegt darin, dass sich drei Viertel der Gebäude in sozialen Erhaltungsgebieten (Milieuschutzgebieten) befinden. Eine Fassadensanierung wird hier nur bei einem Schaden von mindestens 10 Prozent bezogen auf die Gesamtfläche der Fassade genehmigt. Energetische Mängel allein reichen zur Modernisierung einer Fassade nicht aus. Die energetische Sanierung darf zudem nicht über die Mindestanforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) hinausgehen. Weitere Sanierungshemmnisse ergeben sich aus dem Denkmalschutz sowie dem großen Anteil an Gebäuden aus den Baujahren vor 1918, die somit potenziell in die Kategorie der erhaltenswerten Bausubstanz fallen. Eine ausführliche Beschreibung des Stadtgebietes liefert (Dunkelberg et al. 2020a). Die Ergebnisse der Simulation und der Bewertung der unterschiedlichen Entwicklungsoptionen auf der Erzeuger- und Verbraucherseite werden im folgenden Abschnitt gezeigt.

#### 4.1.2 Wärmeversorgungsszenarien

Im Rahmen des Projektes wurden bezüglich der Entwicklung des Wärmebedarfs drei Sanierungsszenarien entwickelt. Neben einem Referenzszenario, das das aktuelle Sanierungsverhalten fortschreibt, wurden in Anlehnung an die Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050 (Reusswig et al. 2014) ein Szenario mit einem ambitionierten energetischen Sanierungsverhalten und eines mit einem sehr ambitionierteren Verhalten unterstellt. Die Sanierungsrate liegt bei 0,6 % im Referenzszenario, bei 1,5 % im Szenario „Ambitionierte Sanierung“ und 2,0 % im Szenario „Sehr ambitionierte Sanierung“. Bei dem sehr ambitionierten Sanierungsszenario ist vorausgesetzt, dass die Einschränkungen hinsichtlich der Sanierungstiefe durch die Regelungen des Milieuschutzes angepasst werden. Bis 2050 reduziert sich der Fernwärmeabsatz um 7 % beziehungsweise um 21 % in den beiden ambitionierten Szenarien. Im Rahmen dieser Arbeit wird für das Gebiet Nord-Neukölln der Fokus auf das sehr ambitionierte Sanierungsszenario mit einer Sanierungsrate von 2 % gelegt.

Hinsichtlich der Wärmeerzeugeroptionen des Modellgebietes Nord-Neuköllns wird der Status Quo von 2018 mit dem Szenario „Status Quo“ und dem Szenario „Status Quo + Abwärme“ betrachtet. Letzteres berücksichtigt auch bereits geplante Vorhaben zur Nutzung industrieller Abwärme und Abwärme aus bestehenden KWK-Anlagen sowie verschiedene Transformationspfade, gestützt durch Momentaufnahmen der Energieversorgung in den Jahren 2030 und 2050. Abbildung 2 gibt die Anlagenzusammensetzung der Wärmeerzeugungsanlagen der verschiedenen Wärmeerzeugerszenarien wieder.

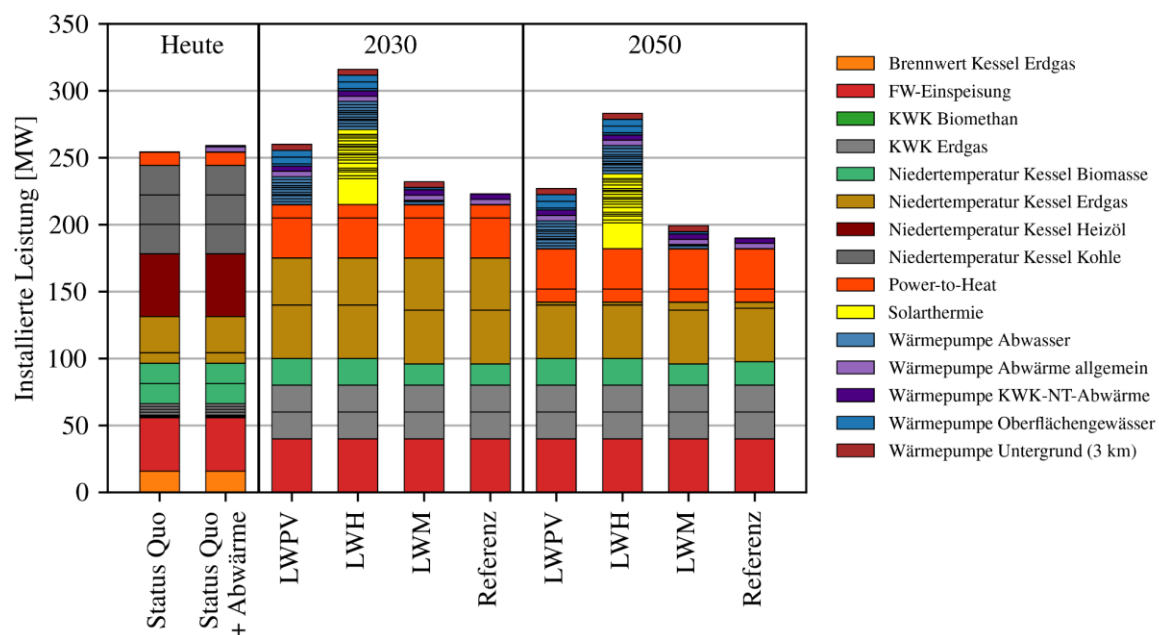


Abbildung 1: Installierte thermische Leistung in den Erzeugerszenarien heute (2019) sowie in den Jahren 2030 und 2050, differenziert nach Technologiekategorien und Einzelanlagen. FW: Fernwärme, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, NT: Niedertemperatur. Alle Werte beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %. Quelle: Universität Bremen, eigene Darstellung aus den Berechnungsergebnissen des IÖW.

Die Transformationspfade „Lokale Wärme und PV“ (LWPV) und „Lokale Wärme hoch“ (LWH) stellen jeweils ambitionierte Szenarien hinsichtlich der ökologischen Wirkung dar. Beide Versorgungsszenarien sehen langfristig eine Integration aller technisch realisierbaren regenerativen Wärmequellen auf

lokaler Ebene vor. Die beinhaltet die Installation von Ab- und Flusswasserwärmepumpen, tiefer Geothermie und gewerblicher Abwärme. Der Unterschied besteht in der Nutzung der Dachflächenpotentiale zur solaren Energiegewinnung. Im Szenario LWPV werden alle technischen nutzbaren Dachflächen durch PV-Anlagen genutzt, während im Szenario LWH die technischen Potentiale an Solarthermie (ST) ausgeschöpft werden.

Das Mittelfeld des Untersuchungsspektrums wird durch das Szenario Lokale Wärme mittel (LWM) skizziert und ist charakterisiert durch eine reduzierte Nutzung lokaler erneuerbarer Wärmequellen. Da einige Hemmnisse für die Erschließung lokalen Wärmequellen bestehen, beschränkt sich das Szenario auf die einfacher erschließbaren Ab- und Flusswasserwärmepotentiale. Solarthermie ist in diesem Szenario ebenfalls nicht vorgesehen.

Das Szenario „Referenz“ skizziert die untere Grenze des untersuchten Spektrums hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkung. Mittelfristig ist das Szenario weiter durch fossile Brennstoffe geprägt, jedoch werden die Kohlekessel durch gasbefeuerte KWK ersetzt. Die langfristige Entwicklung ist weiter durch einen dominanten Einsatz von KWK geprägt, fossile Brennstoffe werden jedoch durch biogene und synthetische substituiert.

Abbildung 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die aus der Simulation resultierende Zusammensetzung des Beitrags zur Wärmebereitstellung der Erzeugerszenarien.

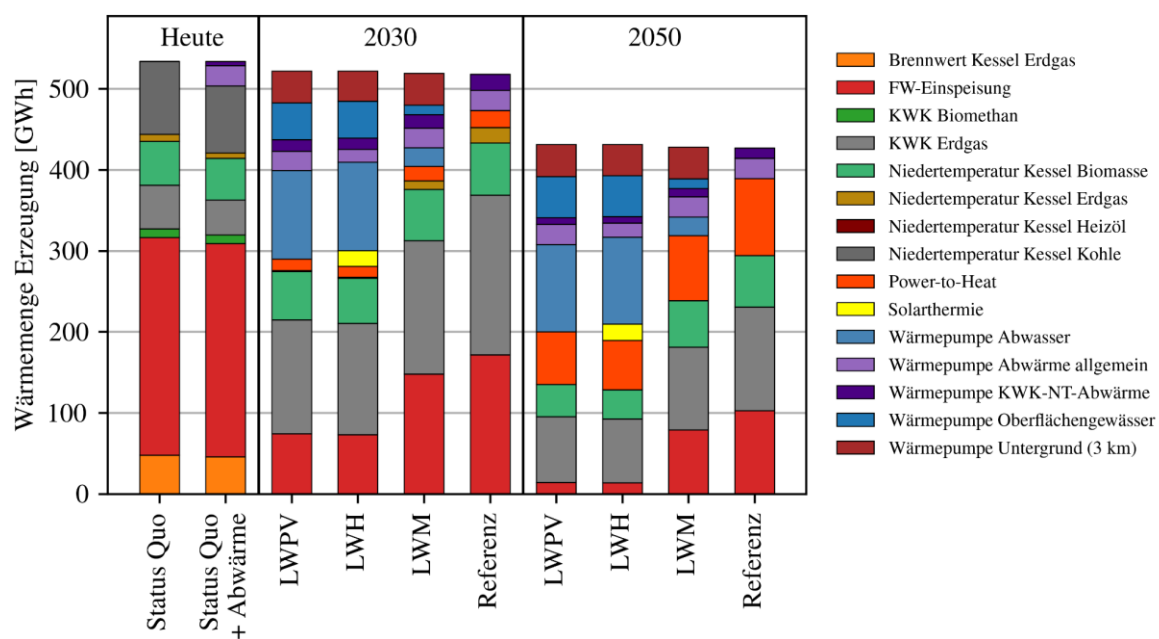


Abbildung 2: Jährliche Wärmebereitstellung in den Erzeugerszenarien heute (2019), sowie in den Jahren 2030 und 2050, differenziert nach Technologiearten. FW: Fernwärme, KWK: Kraft-Wärme-Kopplung, NT: Niedertemperatur. Alle Werte beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %. Quelle: Universität Bremen, eigene Darstellung aus den Berechnungsergebnissen des IÖW.

Es zeigt sich, dass in den Szenarien LWPV und LWH ein beträchtlicher Anteil an Wärme mit Hilfe von Wärmepumpen, PtH, Solarthermie und Biomasse gedeckt werden kann. Im Szenario LWH beträgt dieser Anteil 59,5 % für das Jahr 2030. Im Szenario LWM muss durch die geringeren Wärmepumpenkapazitäten ein größerer Anteil durch die Fernwärme-Einspeisung (FW) aus dem Vattenfall-Wärmenetz

und durch gasbefeuerte KWK geleistet werden. Im Szenario Referenz steigt der Anteil von Erdgaskessel und -KWK und FW-Einspeisung weiter auf einen Anteil von 74,9 % an.

Weiterführende Informationen zu den Sanierungs- und Wärmeerzeugungsszenarien sind in (Dunkelberg et al. 2020a) zu finden.

## 4.2 Klausenerplatz

### 4.2.1 Hintergrund

Der Charlottenburger Klausenerplatz-Kiez ist ein typisches Altbau-Wohnquartier, in dem etwa 50 % der Gebäude durch ein kommunales Wohnungsunternehmen verwaltet werden. In diesem Beispielquartier ging es im Projekt Urbane Wärmewende vor allem um die Frage, welche innovativen energetischen Quartiers- und Wärmekonzepte durch Keimzellen entstehen können. Unter Keimzellen für gebäudeübergreifende Wärmekonzepte versteht das Projektteam etwa größere Gebäudekomplexe, die durch einen Akteur verwaltet werden und die Impulse für die Quartiersentwicklung geben können. Sie stellen einen Großteil des Wärmeverbrauchs im Gebiet und/oder können ein Standort für eine Erzeugungsanlage sein. In Kombination mit einem lokalen Potenzial an erneuerbarer Wärme oder Abwärme kann an einem solchen Standort ein klimaneutrales Quartierswärmekonzept entstehen.

In dem Quartier liegt außerdem mit zwei Abwasserkanälen ein großes Abwasserwärmepotenzial vor. Bei Ausschöpfung beider Potenziale kann nach Aussage der Berliner Wasserbetriebe eine maximale theoretische Entzugsleistung von ca. 6 MW erzielt werden. Im Zentrum der Untersuchung lag daher die Frage, wie diese Wärmequelle in einem gebäudeübergreifenden Wärmekonzept genutzt werden kann. Da sich das Abwasserwärmepotenzial auf die Blöcke im nordwestlichen Teil des Gebietes konzentriert, beschränken sich die Analysen in dieser Arbeit auf einen Block. Um zu prüfen, inwiefern das Wärmekonzept übertragbar ist auf andere Rahmenbedingungen, erfolgten Analysen mit einer Luft- anstelle einer Abwasserwärmepumpe. Technisch kann eine Wärmepumpe zur Nutzung der Abwasserwärme mit einem BHKW, einem Gaskessel, aber auch mit anderen erneuerbaren Wärmeerzeugern kombiniert werden. Die Effizienz von Wärmepumpen hängt in hohem Maße vom Temperaturniveau der Wärmequelle (hier Abwasser) und der Wärmeabnehmer ab. In dem Altbau-Quartier liegen die Temperaturanforderungen auf der Verbraucherseite überwiegend auf einem hohen Niveau. Daher ist die energetische Gebäudesanierung wichtiger Bestandteil eines Quartierswärmekonzeptes, welches Abwasserwärme nutzt.

### 4.2.2 Wärmeversorgungsszenarien

Für die Bereitstellung der Wärme in der Heizzentrale des untersuchten Quartiers sind ein BHKW und mehrere Kesselanlagen im Einsatz, die mit Erdgas, Heizöl, Holzpellets und Steinkohle befeuert werden. Die Untersuchung legt den Schwerpunkt auf die mögliche Nutzung des im Quartier vorhandenen Abwasserwärmepotenzials. Die Nutzung von Abwasserwärme mit einer Groß-Wärmepumpe wurde kombiniert mit unterschiedlichen anderen Wärmeerzeugern (vergleiche Abbildung 3). Außerdem erfolgte eine Variation, indem anstelle der Abwasserwärmepumpe eine Luft-Wärmepumpe betrachtet wurde. Damit soll geprüft werden, inwiefern die Ergebnisse übertragbar auf Quartiere ohne Abwasserwärmepotenziale sind. Solarthermie (ST) wurde ebenfalls als Wärmeerzeugungsoption berücksichtigt, wobei die lokalen Potenziale gering sind. Eine Eigenversorgung der Wärmepumpe mit lokal erzeugten PV-Strom wurde ebenfalls simuliert. Die Referenz bildet die Versorgung mit einem BHKW und einem Gaskessel, was dem Status Quo entspricht. Im Quartier ist bereits ein Wärmenetz vorhanden, das für die

Verteilung genutzt werden kann. Für die Wärmeerzeugung wurden demnach die folgenden Optionen betrachtet:

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Wärmeerzeugerszenarien.

Erzeugerszenario	Beschreibung
BHKW Kessel	Gas-Kessel, kleines BHKW (82 kW) (Status quo)
BHKW <sub>gr</sub> Abw	Gas-Kessel, Abwasserwärmepumpe, großes BHKW (165 kW)
BHKW <sub>kl</sub> Abw	Gas-Kessel, Abwasserwärmepumpe, kleines BHKW (82 kW)
BHKW <sub>kl</sub> Abw PV	Gas-Kessel, Abwasserwärmepumpe, kleines BHKW (82 kW), PV (mit Eigenverbrauch)
BHKW <sub>kl</sub> Abw ST	Gas-Kessel, Abwasserwärmepumpe, kleines BHKW (82 kW), Solarthermie
BHKW <sub>kl</sub> Abw Luft	Gas-Kessel, Luftwärmepumpe, kleines BHKW (82 kW)

Ferner wurden bei dem Gebiet Klausenerplatz unterschiedliche Sanierungsmöglichkeiten in den Blick genommen, um die Bandbreite an Entwicklungsoptionen und die Wechselwirkungen mit der Erzeugungsseite aufzuzeigen. Abbildung 3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Zusammensetzung des Anlagenparks der verschiedenen Wärmeversorgungskonzepte, und Abbildung 4 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gibt die mit Hilfe des Simulationsmodells berechneten Beiträge zur Wärmeversorgung wieder, jeweils für den aktuellen Sanierungsstand und bei Vollsanierung. Weiterführende Informationen zu dem Untersuchungsgebiet, den Wärmeerzeugerszenarien sowie den Sanierungsszenarien findet sich in (Dunkelberg et al. 2020b).

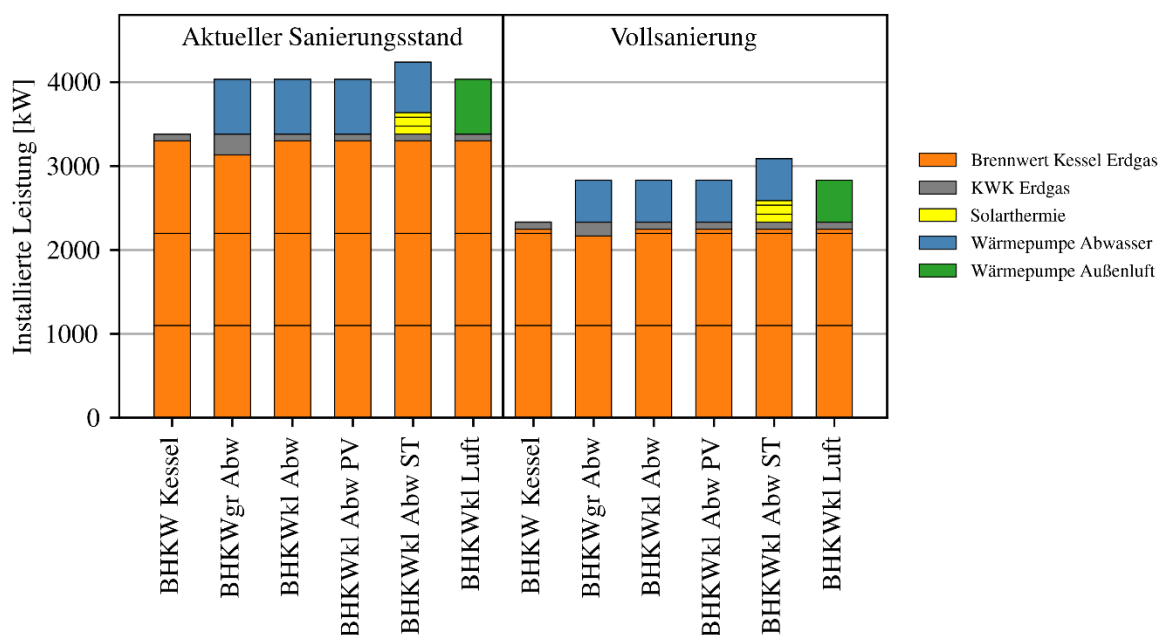


Abbildung 3: Installierte thermische Leistung der Wärmeerzeugerszenarien für den aktuellen Sanierungsstand und bei Vollsanierung. KWK: Kraft-Wärme-Kopplung. Quelle: Universität Bremen, eigene Darstellung aus den Berechnungsergebnissen des IÖW.

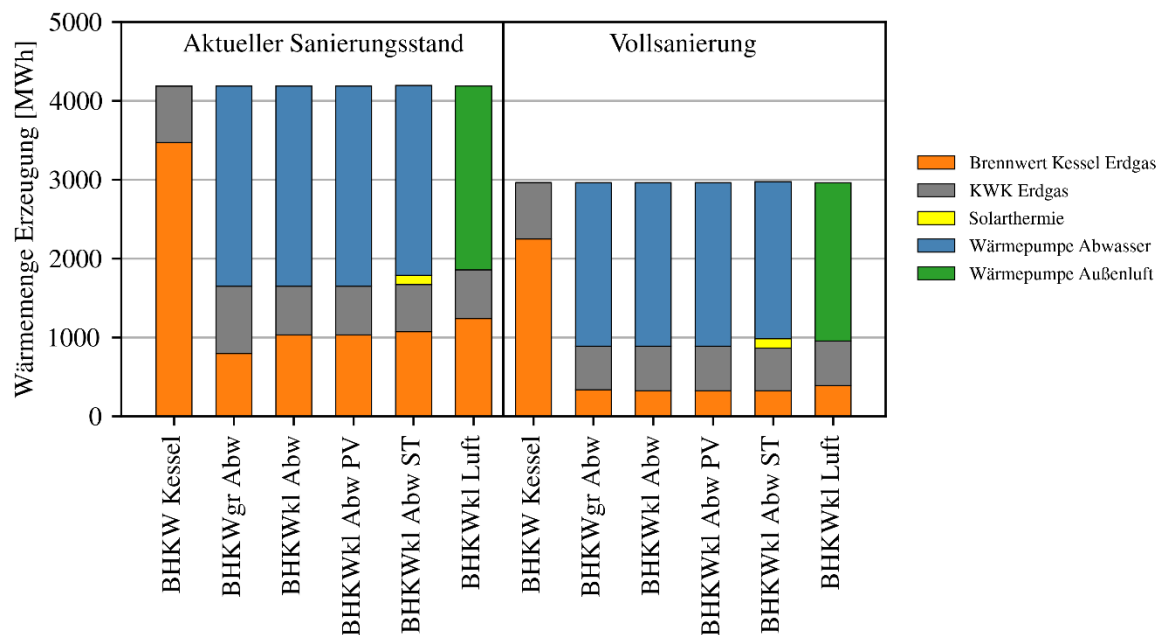


Abbildung 4: Jährliche Wärmebereitstellung der Wärmeerzeugerszenarien für den aktuellen Sanierungsstand und bei Vollsanierung. KWK: Kraft-Wärme-Kopplung. Quelle: Universität Bremen, eigene Darstellung aus den Berechnungsergebnissen des IÖW.

## 5 Ergebnisse und Diskussion der Resilienzbewertung

### 5.1 Nord-Neukölln

#### 5.1.1 Diversität

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Diversitätsbewertung der Wärmeerzeugerszenarien des Sanierungsszenarios mit einer Sanierungsquote von 2 % anhand des Stirling-Index dargestellt. Die Untersuchung der Fallbeispiele zeigt, dass bei Einschlagung des ambitionierten Transformationspfades mittelfristig die Diversität des Gebiets erhöht wird. Der Stirling-Index aller Erzeugerszenarien des Jahres 2030 liegt über den Werten des Status-Quo (vgl. Abbildung 5). Dies ist auf die vorangegangene teilweise Substitution fossiler Brennstoffe durch biogene und synthetische sowie durch elektrifizierte Versorgungstechnologien zurückzuführen. Mit fortschreitender Transformation verschiebt sich das Gleichgewicht zur strombasierten Wärmeversorgung, wodurch die Diversität des Systems verringert wird. Insbesondere in den Szenarien LWPV und LWH hoch verringert sich der Wert des Stirling-Index in den Erzeugerszenarien des Jahres 2050. Für den konservativen Transformationspfad ergibt sich eine kontinuierliche Steigerung der Diversität. Im Jahr 2030 liegt der Stirling-Index zwar noch unter, in den Varianten des Jahres 2050 dann aber über den Index-Werten der ambitionierten Transformationspfade. Aufgrund einer breit aufgestellten Ressourcenbasis der Wärmeversorgungsanlagen übersteigt die Diversität des konservativen Transformationspfades die des ambitionierten im Jahr 2050 deutlich.

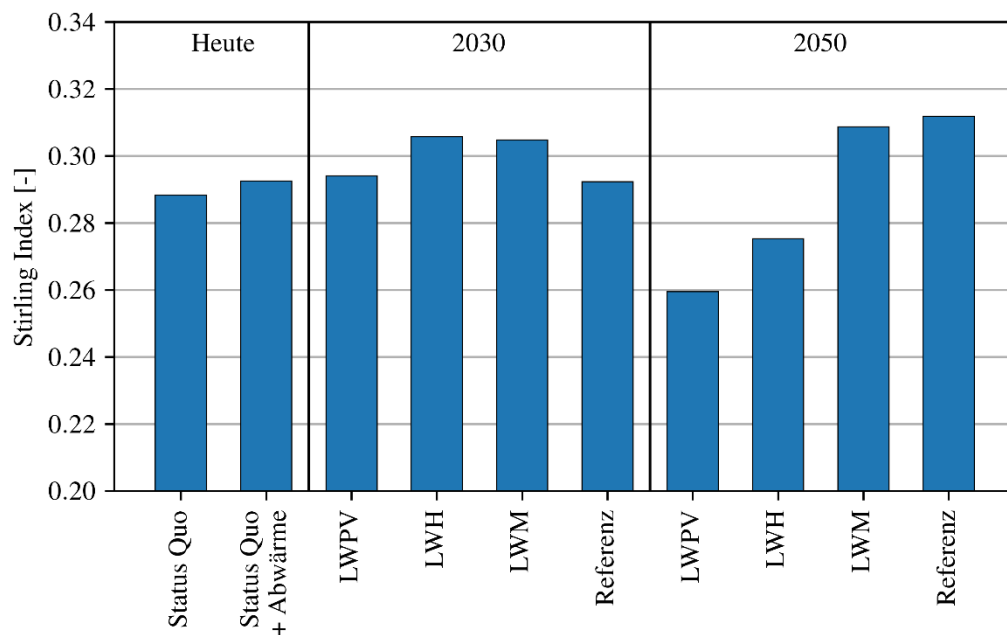


Abbildung 5: Diversität anhand des Stirling-Indexes in den Erzeugerszenarien heute (2019), sowie in den Jahren 2030 und 2050. Alle Werte beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %.

### 5.1.2 Redundanz

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse des Redundanz-Index der Wärmeerzeugerszenarien des Sanierungsszenarios mit einer Sanierungsrate von 2 % dargestellt. Da es sich um das Versorgungsrisiko in kWh handelt, bedeuten größere Werte ein größeres Versorgungsrisiko.

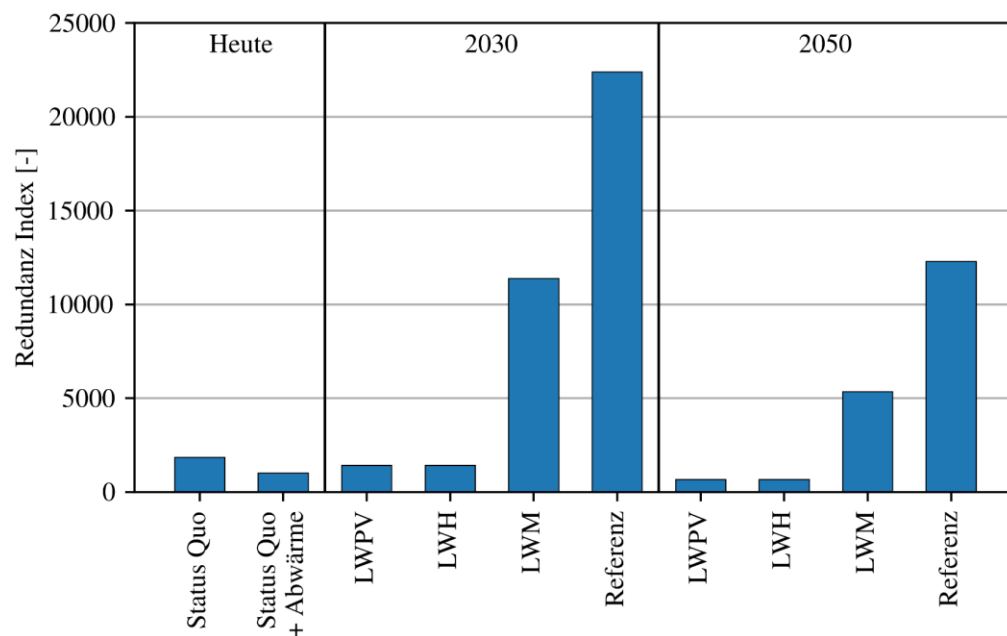


Abbildung 6: Redundanz der Erzeugerszenarien des Status Quo sowie in den Jahren 2030 und 2050. Alle Werte beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %.



Ausgehend vom derzeitigen Anlagenbestand (Szenario Status quo) führt die zusätzliche Installation von Wärmepumpenkapazitäten (Wärmepumpe Abwärme und KWK-Niedertemperatur-Wärme) zu einer Steigerung der Redundanz. Das Risiko der Unterversorgung verringert sich also. Im den Versorgungskonzepten für das Jahr 2030 verbessert sich die Redundanz in den Szenarien LWPV und LWH, während sich die Redundanz in den Szenarien LWM und „Status Quo“ verringert. Dies liegt an den zusätzlich installierten Abwasser- und Oberflächenwasser-Wärmepumpen, die in diesen Szenarien berücksichtigt werden. In dem Szenario „Status Quo“ ergibt sich das größte Versorgungsrisiko, da hier keine Erschließung von dezentralen Wärmekapazitäten vorgesehen sind. In den Versorgungsszenarien des Jahres 2050 nimmt das Versorgungsrisiko in allen Szenarien im Vergleich zum Jahr 2030 ab, da durch die Berücksichtigung einer Sanierungsquote von 2 % der Wärmebedarf abnimmt. Die relativen Unterschiede zwischen den Erzeugerszenarien bleiben bestehen. Insgesamt ist in allen Szenarien das n-1-Kriterium erfüllt, d.h. das Versorgungsrisiko bei Ausfall einer Anlage ist gleich null. Erste beim Ausfall von zwei Anlagen und mehr würde es zu einer Unterdeckung kommen.

### 5.1.3 Lose Kopplung

Ein zur Diversität ähnliches Trendbild ergibt sich bei der Betrachtung der Anteile der erzeugten Wärmemenge aus lose gekoppelten Anlagen, siehe Abbildung 7.

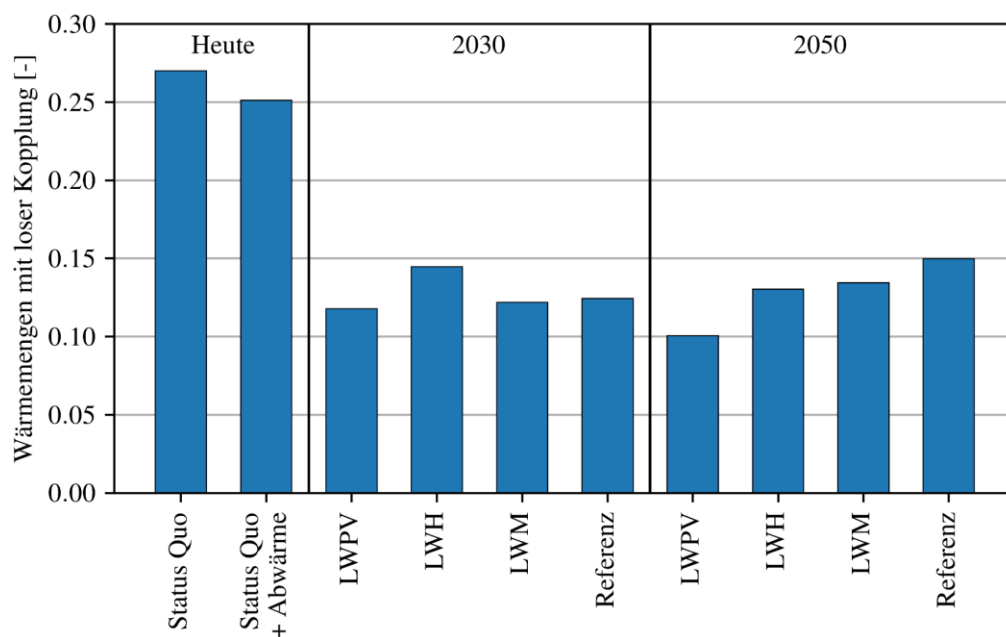


Abbildung 7: Anteil an der Jahreswärmeenergiebereitstellung aus lose gekoppelten Anlagen in den Erzeugerszenarien heute (2019) sowie in den Jahren 2030 und 2050. Alle Werte beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %.

In einem mittleren Zeithorizont (2030) erzielt der ambitionierte Transformationspfad die besseren Ergebnisse. Langfristig (2050), also mit fortschreitender Transformation und somit fortschreitender Elektrifizierung des Wärmesektors, schneidet der konservative Transformationspfad besser ab. Auffallend ist, dass in Relation zum Status quo, die untersuchten Transformationsszenarien hinsichtlich der Anteile an erzeugter Wärmemenge aus lose gekoppelten Anlagen schlechter abschneiden. Dies liegt vor allem an den in 2030 und 2050 nicht mehr vorhandenen Kapazitäten von Kohle-basierter Wärmeerzeugung.

#### 5.1.4 Subsidiarität

Subsidiarität wird in dieser Studie über den Eigenerzeugungsanteil aus lokal verfügbaren Ressourcen operationalisiert. Nur Szenarien, bei denen die Wärmepumpen anteilig mit Photovoltaikstrom betrieben werden oder es solarthermische Beiträge gibt, wurden dabei berücksichtigt. Im Ergebnis liegt die Eigenerzeugungsquote durchgehen unter fünf Prozent, und es wird nur in vier von zehn Szenarien überhaupt Wärme aus lokalen Ressourcen erzeugt. Am besten schneidet dabei das Erzeugerszenario LWH für das Jahr 2050 ab, gefolgt von LWH für das Jahr 2030 (vergleiche Abbildung 8).

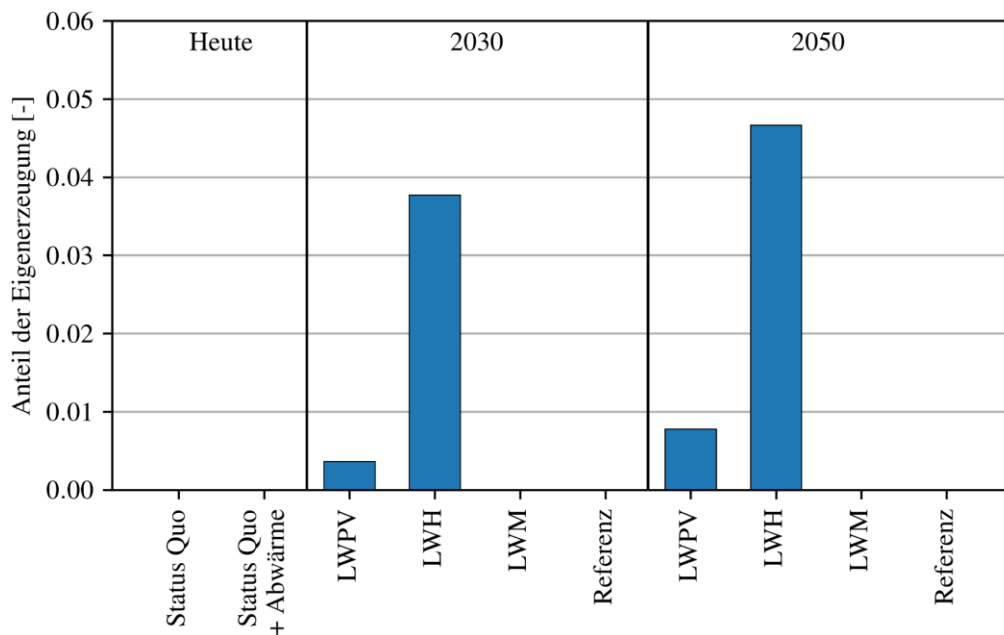


Abbildung 8: Eigenerzeugungsanteil als Indikator für Subsidiarität in den Erzeugerszenarien heute (2019) sowie in den Jahren 2030 und 2050. Alle Werte beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %.

#### 5.1.5 Zusammenfassung

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Indikatoren basierten Bewertung der Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten vor dem Hintergrund der Veränderungen der Transformationspfade gegenüber dem Status Quo Szenario für das Modellgebiet Nord-Neukölln dargestellt:

Tabelle 3: Ergebnisübersicht der Resilienzbewertung für das Gebiet Nord-Neukölln. Ergebnisse von Diversität, Redundanz, lose Kopplungen und Subsidiarität über die Szenarien: + = Verbesserung, - = Verschlechterung, o = keine Veränderung. Alle Ergebnisse beziehen sich auf das Verbraucherszenario mit Sanierungsrate 2 %.

	Status Quo		2030				2050			
	Status Quo	Status Quo + Abwärme	Lokale Wärme hoch	Lokale Wärme und PV	Lokale Wärme mittel	Referenz	Lokale Wärme hoch	Lokale Wärme und PV	Lokale Wärme mittel	Referenz
Diversität	o	+	+	+	+	+	-	+	+	+
Redundanz	o	+	+	+	-	-	+	+	-	-
Lose Kopplungen	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Subsidiarität	o	o	+	+	o	o	+	+	o	o

Insgesamt schneiden die Erzeugerszenarien LWH und LWPV am besten ab. In beiden Szenarien steigen die Indikatoren der Designprinzipien Diversität, Redundanz und Subsidiarität im Verbrauchsszenario des Jahres 2030 gegenüber dem „Status Quo“-Szenario an, lediglich der Anteil an Wärmeenergie aus lose gekoppelten Anlagen nimmt ab. Im Szenario des Jahres 2050 ist beim Erzeugerszenario LWPV ebenfalls eine Verbesserung bei diesen drei Indikatoren zu verzeichnen, und im Szenario LWH immerhin bei den beiden Indikatoren der Redundanz und Subsidiarität.

Obwohl die Bewertung der Resilienzeffekte der Maßnahmen in den Szenarien kein eindeutiges Bild ergibt, lassen sich aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen verallgemeinern, wodurch die Resilienz der Fernwärmeversorgung im Gebiet Nord-Neukölln erhöht werden könnte. Zum einen sollte das leitungsgebundene Fernwärmesystem mit unterschiedlichen Technologien zur Wärmebereitstellung ausgestattet werden. Dabei ist zu beachten, dass deren jeweilige Funktionsweise möglichst auf verschiedenen Energieträgern und Steuerungsroutinen basiert.

Um die Abhängigkeit von der Kopplung zwischen Wärme- und Stromsektor im Sinne der Resilienz zu minimieren, sind flexible Wärmeversorgungssysteme mit hinreichend großen Speichern vorzusehen. Insbesondere thermische Speicher werden als besonders wichtig erachtet. Diese ermöglichen einen flexiblen Betrieb von KWK-Anlagen, die damit teils unabhängig vom Wärmebedarf auf die Anforderungen des Stromnetzes reagieren können. Weiter sollten die Wärmeerzeuger selbst bereits so gestaltet sein, dass diese im Notfall unabhängig den Strom oder den Wärmemarkt bedienen können, und in diesem Sinne entkoppelungsfähig sind. Dies ist zum Beispiel ein BHKW in Kombination mit einer Wärmepumpe oder einem Elektrodenkessel, sodass die gesamte elektrische Leistung des BHKW im Notfall in Wärme umgesetzt werden kann. Zusätzlich ermöglichen eine Rückkühlvorrichtungen den Betrieb des BHKW zur Stromerzeugung selbst wenn kein Wärmebedarf vorhanden ist. Zur Minimierung der Abhängigkeit der Wärmeversorgung vom Stromnetz sind Notstromkonzepte zur Versorgung der Steuerungsmodule und IKT-Systeme zu integrieren, die einen vorübergehenden Betrieb unabhängig vom Zustand des Stromsektors ermöglichen. Die Diversifizierung der leitungsgebundenen Rohstoffquellen kann durch die Modifizierung von Gasanlagen für den Betrieb mit Flüssiggas oder anderen Brennstoffen erreicht werden. Die starre Kopplung der meisten modernen Systeme, aufgrund ihrer Steuerungs- und Regelungselektronik an das Stromnetz, wird durch die Installation einer Notstromversorgung bereits adressiert.

## 5.2 Klausenerplatz

### 5.2.1 Diversität

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Diversitätsbewertung der Wärmeerzeugerszenarien der beiden Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“ anhand des Stirling-Index dargestellt.

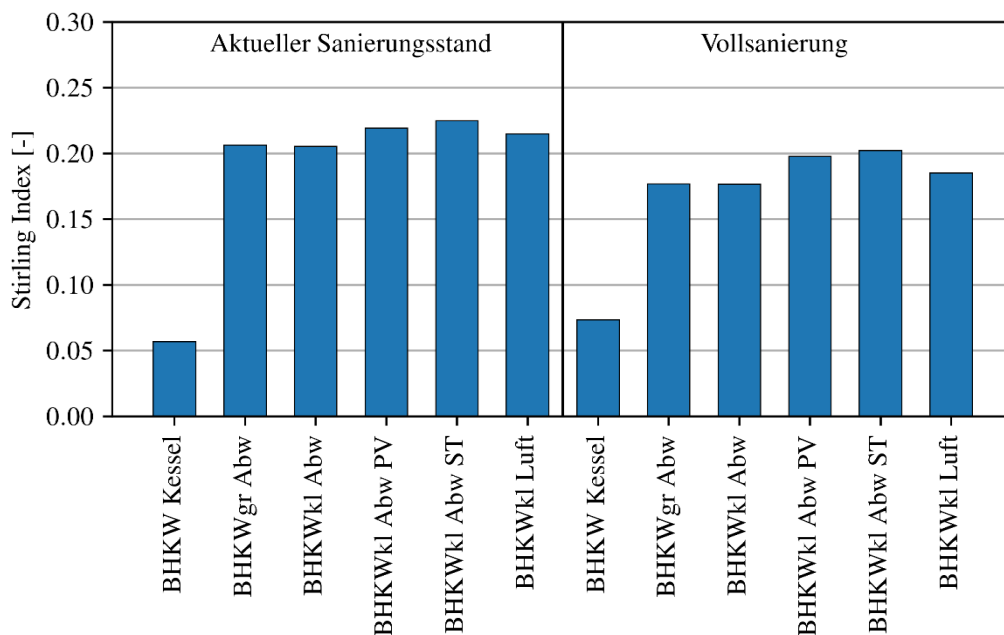


Abbildung 9: Vergleich des Stirling-Index zur Bewertung der Diversität verschiedener Erzeugerszenarien unter Berücksichtigung der Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungsstand“ und „Vollsanierung“.

Die Untersuchung der Fallbeispiele zeigt, dass die Verwendung von strombasierter Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen die Diversität in allen Erzeugerszenarien im Vergleich zur konventionellen BHKW/Gaskessel Versorgung deutlich erhöht. Die zusätzliche Nutzung von Sonnenenergie durch Photovoltaik- bzw. Solarthermie-Anlagen führt in beiden Verbrauchsszenarien zu einer weiteren Steigerung der Diversität. Beim Vergleich der Verbrauchsszenarien untereinander reduziert sich die Diversität in allen Szenarien bei Vollsanierung mit Ausnahme der konventionellen Referenzvariante „BHKW Kessel“. Ursache ist hierbei der gesteigerte Energieanteil, der durch die Wärmepumpe und die solaren Energiequellen gedeckt werden kann. Der Anteil der fossilen Wärmebereitstellung wird dabei stark reduziert, was aus ökologischer beziehungsweise Klima-Sicht zu bevorzugen ist. Um die Resilienz des Systems zu erhalten, sollten die Anteile verschiedener erneuerbaren Energiequellen soweit gesteigert werden, dass die Diversität weiterhin hoch bleibt. Dabei könnte zum Beispiel der solare Anteil weiter erhöht, biogene Brennstoffe eingesetzt, oder auf verschiedene Wärmepumpen-Technologien bzw. Wärmequellen gesetzt werden.

### 5.2.2 Redundanz

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse des Redundanz-Index der Wärmeerzeugerszenarien der beiden Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“ dargestellt. Da es sich um das Versorgungsrisiko gemessen in kWh handelt, bedeuten größere Werte ein größeres Versorgungsrisiko.

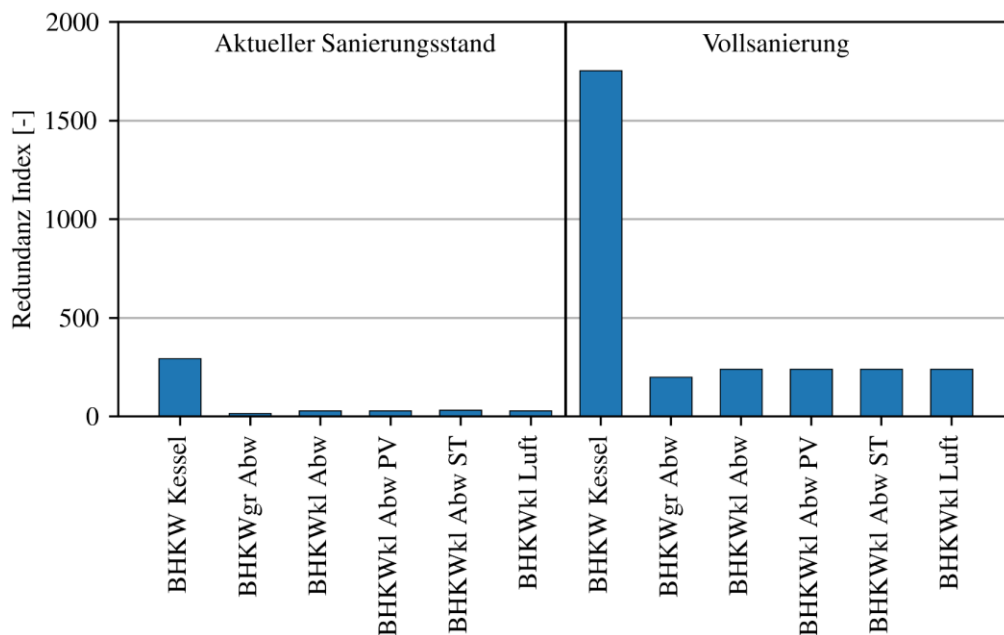


Abbildung 10: Darstellung des Redundanz-Index der Erzeugerszenarien für den aktuellen Sanierungszustand und bei Vollsanierung.

Ausgehend vom derzeitigen Anlagenbestand (Erzeugungsszenario „BHKW Kessel“) führt die zusätzliche Installation von Wärmepumpenkapazitäten (Abwasser-Wärmepumpe) zu einer Steigerung der Redundanz in beiden Verbrauchsszenarien. Das Risiko der Unterversorgung verringert sich dadurch. Die zusätzlichen Wärmepumpen-Kapazitäten würden im aktuellen Sanierungszustand sogar zum Erreichen des n-2 Kriteriums führen, d.h. es können zu jedem Zeitpunkt im Jahr zwei Anlagen ausfallen, ohne dass es zu einer Unterversorgung kommen könnte. Im Verbrauchsszenario „Vollsanierung“ liegen die Werte des Redundanz-Index in allen Szenarien über dem des aktuellen Sanierungszustandes, da hier bei der Konzeptionierung auf Grund des gesunkenen Wärmebedarfs weniger Gasspitzenlastkessel vorgesehen sind. Daher steigt der Redundanz-Index zwar leicht an, führt allerdings nicht zu einer Verletzung des n-1 Kriteriums. Grundsätzlich wurde die Installation von Redundanzen in ausreichender Form in allen Szenarien berücksichtigt. Das Risiko der Unterversorgung liegt auf einem sehr niedrigen Niveau. In diesem Bereich ergibt sich aus Sicht der Resilienz keine Handlungsempfehlung.

### 5.2.3 Lose Kopplung

Ein klarer Trend zeichnet sich bei der Betrachtung der Wärmemengenanteile aus lose gekoppelten Anlagen, wie Abbildung 11 zeigt.

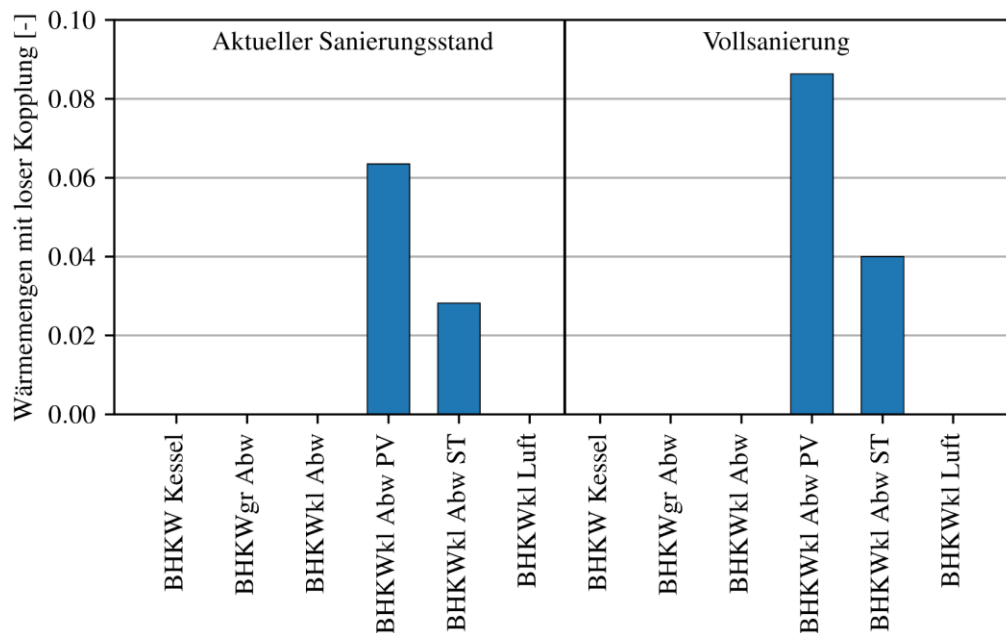


Abbildung 11: Anteile der Wärmeerzeugungsmengen aus lose gekoppelten Anlagen in den Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“.

Lediglich in den Szenarien „BHKWkl Abw PV“ und „BHKWkl Abw ST“ tragen lose gekoppelte Anlagen zur Wärmebereitstellung bei. Dabei liegen die Anteile in dem Verbrauchsszenario „Vollsanierung“ höher, da bei gleichbleibenden Anlagenkapazitäten ein höherer Beitrag zur Wärmebereitstellung realisiert werden kann. Die Erzeugertechnologien Erdgaskessel und BHKW sind fest an das Gasnetz gekoppelt, während die Abwasser- und die Luftwärmepumpen ohne eine PV-Anlage an das Stromnetz gekoppelt sind. Nur falls zusätzlich zur Abwasserwärmepumpe eine PV-Anlage installiert ist (oder eine Solarthermieanlage), kann ein Teil der Wärmeinfrastruktur unabhängig bereitgestellt werden. Daher empfiehlt es sich den Anteil an Wärmeerzeugern mit lose gekoppelten Erzeugungsanlagen zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit wäre einen Spitzenlast- bzw. Reservekessel durch einen Öl- statt einem Gaskessel zu ersetzen. Damit wäre über einen Öltank eine lose Kopplung hergestellt und die CO<sub>2</sub>-Bilanz wegen der geringen Energiemenge zur Deckung der Spitzenlast nur minimal verschlechtert. Eine weitere Alternative bilden erneuerbare Festbrennstoffe wie Hackschnitzel oder Pellets, deren kurz- bis mittelfristige Verfügbarkeit nicht von leitungsgebundenen Infrastrukturen (Strom und Gas) abhängen, und damit die Anlagen im Inselbetrieb gefahren werden können.

#### 5.2.4 Subsidiarität

Subsidiarität wird in dieser Studie über den Eigenerzeugungsanteil aus lokal verfügbaren Ressourcen operationalisiert. Nur Szenarien, bei denen die Wärmepumpen anteilig mit Photovoltaikstrom betrieben werden, oder es solarthermische Beiträge gibt, wurden dabei berücksichtigt. Im Ergebnis entspricht die Eigenerzeugungsquote derjenigen der Anteile der Wärmeerzeugungsmengen aus lose gekoppelten Anlagen. (vergleiche Abbildung 12).

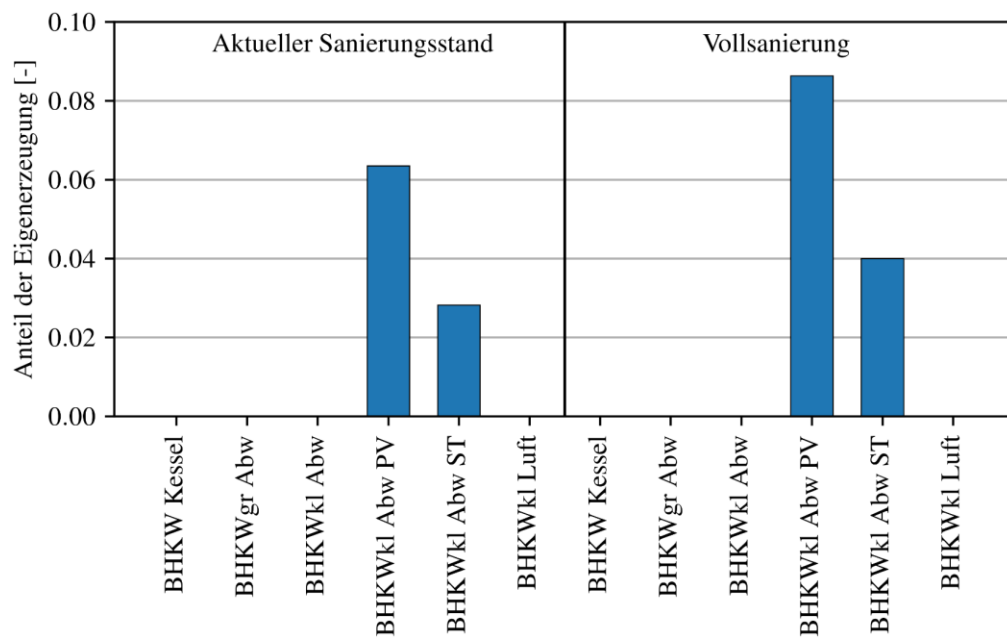


Abbildung 12: Eigenerzeugungsanteil als Indikator für Subsidiarität in den Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“.

### 5.2.5 Zusammenfassung

In Tabelle 4 werden die Ergebnisse der Indikatoren-basierten Resilienzbewertung der verschiedenen Erzeugerszenarien miteinander verglichen. Dabei bildet die Variante „BHKW Kessel“ die Referenz. Für beide Sanierungsszenarien „Aktueller Sanierungsstand“ und „Vollsanierung“ fällt die relative Veränderung der Indizes der Resilienz-Designprinzipien im Vergleich zur Referenz identisch aus.

Tabelle 4: Ergebnisübersicht der Resilienzbewertung für das Gebiet Klausenerplatz. Ergebnisse von Diversität, Redundanz, lose Kopplungen und Subsidiarität der Wärmeerzeugerszenarien: + = Verbesserung, - = Verschlechterung, o = keine Veränderung.

	Aktueller Sanierungsstand / Vollsanierung					
	BHKW Kessel	BHKWgr Abw	BHKWkl Abw	BHKWkl Abw PV	BHKWkl Abw ST	BHKWkl Abw Luft
Diversität	o	+	+	+	+	+
Redundanz	o	+	+	+	+	+
Lose Kopplungen	o	o	o	+	+	o
Subsidiarität	o	o	o	+	+	o

Hinsichtlich der Resilienz sind die Szenarien „BHKWkl Abw PV“ und „BHKWkl Abw ST“ zu bevorzugen. Diese Varianten zeichnen sich durch die höchste Diversität durch die Abwasserwärmepumpe und die zusätzliche Installation von ST- bzw. PV Anlagen aus. Ferner weisen diese beiden Varianten als einzige Wärmemengenanteile mit loser Kopplung und aus Eigenerzeugung auf.

Tabelle 5 gibt einen Vergleich zwischen den Sanierungsszenarien „Aktueller Sanierungsstand“ und „Vollsanierung“ wieder.



Tabelle 5: Ergebnisübersicht der Resilienzbewertung für das Gebiet Klausenerplatz. Ergebnisse von Diversität, Redundanz, lose Kopplungen und Subsidiarität der Wärmeerzeugerszenarien: + = Verbesserung, - = Verschlechterung, o = keine Veränderung.

Designprinzip	Versorgungsvariante	Aktueller Sanierungsstand	Vollsanierung
Diversität	BHKW Kessel	o	+
	BHKWgr Abw	o	-
	BHKWkl Abw	o	-
	BHKWkl Abw PV	o	-
	BHKWkl Abw ST	o	-
	BHKWkl Abw Luft	o	-
Redundanz	alle Varianten	o	-
Lose Kopplungen	BHKW Kessel	o	o
	BHKWgr Abw	o	o
	BHKWkl Abw	o	o
	BHKWkl Abw PV	o	+
	BHKWkl Abw ST	o	+
	BHKWkl Abw Luft	o	o
Subsidiarität	BHKW Kessel	o	o
	BHKWgr Abw	o	o
	BHKWkl Abw	o	o
	BHKWkl Abw PV	o	+
	BHKWkl Abw ST	o	+
	BHKWkl Abw Luft	o	o

Dabei zeigt sich, dass die Diversität in allen Varianten mit Ausnahme der Referenzvariante abnimmt. Durch den geringeren Wärmebedarf verringert sich in diesen Varianten der Energieanteil der Gaskessel, während der Deckungsanteil durch die Abwasserwärmepumpe zunimmt. In Summe führt dies zu einer weniger gleich verteilten Wärmebereitstellung und damit zu einer Verringerung der Diversität.

Bei gleichbleibender Anlagenkapazität würde die Reduktion des Wärmebedarfs zu einer Erhöhung des Redundanzindex führen. Hier wurde bei der Anlagenauslegung ein geringerer Wärmebedarf und daher geringere Kapazitäten an Gaskesselleistung berücksichtigt. Dies führt daher zu einer Verschlechterung des Redundanzindex. Ein gleicher Redundanzindex kann in den Erzeugerszenarien des Sanierungsszenarios „Vollsanierung“ leicht durch eine nicht derart drastische Reduzierung der Gaskesselkapazitäten erreicht werden.

Die Indexwerte der losen Kopplungen und Subsidiarität erhöhen sich im Falle einer Vollsanierung. Durch die Reduzierung des Wärmebedarfs erhöht sich der relative Anteil der lokalen Ressourcen, die sowohl dem Designprinzip der losen Kopplungen als auch der Erhöhung des Eigenerzeugungsanteils als Indikator der Subsidiarität zuträglich sind.

In Summe wirken die Durchführung von Sanierungen und die daraus resultierende Senkung des Wärmebedarfs Resilienz-steigernd. Zum einen kann die Verschlechterung bei der Redundanz leicht behoben werden. Zum anderen ergeben sich positive Effekte für den Anteil der lose gekoppelten Anlagen und

der Subsidiarität. Mit Blick auf die Diversität sollte versucht werden den Wegfall der fossilen Wärmeerzeuger durch einen diversen Mix aus erneuerbaren und strombasierten Wärmeerzeugern zu kompensieren. Dies kann beispielsweise durch die Installation verschiedener Wärmepumpentypen, zum Beispiel einer Kombination aus Abwasser- und Luftwärmepumpe, erfolgen.

### 5.3 Diskussion der Bewertungsmethodik

Bedingt durch die berücksichtigten Eingangs- und Ausgabeparameter des Simulationsmodells konnten nur die im Methodenkapitel dargestellten Resilienz Design-Prinzipien operationalisiert und angewandt werden. Im optimalen Fall sollten jedoch weitere Resilienz Designprinzipien operationalisiert und deren Effekte als Ganzes betrachtet werden. Ein wichtiges und in dieser Bewertung fehlendes Gestaltungsprinzip ist das der Speicher und Puffer. Speicher und Puffer führen zur Überbrückung oder im Falle einer starken Störung zu einer geringen und zeitlich verzögerten Reaktion des Systems bzw. der Komponenten. So verschafft diese inhärente Trägheit der Reaktion Spielraum für Maßnahmen, mit denen Auswirkungen des Versagens abgemildert werden können (Lovins und Lovins 1982). Im Kontext der Wärmeversorgung ermöglichen Energiespeicher und -puffer eine teilweise Entkopplung von Verbrauch und Erzeugung. Sie haben eine ausgleichende Funktion und erhöhen die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Systems. Das Designprinzip Speicher-, Puffer-, und Dämpferkapazitäten ist in den betrachteten Szenarien anteilig realisiert, da neben den jeweiligen Gebäudeinfrastrukturen das Wärmenetz als Puffer dient. Die Berücksichtigung solcher Kapazitäten ist darüber hinaus nicht nur für die Resilienz des Systems, sondern auch für die Flexibilität förderlich und sollte daher in der zukünftigen kommunalen Wärmeplanung Beachtung finden.

Genauso wie Resilienz bei der Transformation von Energiesystemen mit anderen Zielgrößen wie Defossilisierung und Kosteneffizienz konkurriert, gibt es auch Zielkonflikte bei der Implementierung von Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten. Beispielsweise wird mit zunehmender Diversität des Systems die Komplexität gleichermaßen zunehmen oder vielmehr das Designprinzip der Einfachheit abnehmen. Um die allgemeine Resilienz beurteilen zu können, ist es erforderlich, neben der bereits erwähnten Entwicklung einer Methodik zur Quantifizierung weiterer Designprinzipien eine Gesamtbeurteilung unter einer gewichteten Berücksichtigung aller Designprinzipien abzuleiten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Betrachtung der bekannten gegenwärtigen und zukünftigen Gefährdungen für Fernwärmeversorgungssysteme wurde zur Vorbereitung eines Systems auf im Zuge der Transformation des Energiesystems noch gänzlich unbekannte Gefährdungen (sogenannte *unkown-unknowns*) das Leitkonzept der Resilienz erläutert. Zur Bewertung verschiedener Energieversorgungskonzepte hinsichtlich der Resilienz wurde eine auf Indikatoren basierte Methodik zur Quantifizierung der Wirkung von Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten Diversität, Redundanz, lose Kopplungen und Subsidiarität entwickelt.

Die Anwendung der Bewertungsmethode in den Fallstudien zeigt, dass die Bewertungsindikatoren plausible und nachvollziehbare Ergebnisse liefern können. Die hier vorgestellte indikatorbasierte Bewertung bietet daher einen Ansatz, einen quantitativen Vergleich der Resilienz verschiedener Energiesysteme zu ermöglichen, obgleich aufgrund der Berücksichtigung bisher nur ausgewählter Strukturen und Funktionalitäten sich nur Tendenzen ableiten lassen.

Bei der Bewertung des Gebietes Nord-Neukölln zeigt sich, dass die Nutzung von Abwasser-, Flusswasser- und sonstigen Abwärmequellen sowie lokaler solarer Energiequellen mittelfristig zu einer Steigerung der Diversität beiträgt. Langfristig wird jedoch, bei hohen Anteilen strom-basierter Wärmeerzeugung und bei einer Reduzierung des Wärmebedarfs, die Diversität vermindert. Hinsichtlich der Redundanz wirkt sich die zusätzliche Installation von Wärmepumpenkapazitäten positiv aus. Der zukünftige Wegfall von Kohle- und Ölkessel wirkt sich in allen Varianten negativ auf den Anteil loser Kopplungen aus. Die Nutzung solarer Energiepotentiale trägt zu einer Steigerung der Subsidiarität bei. In Summe sollte aus Sicht der Resilienz die Erschließung von möglichst vielen (Ab-) Wärmequellen und Dachflächenpotentialen forciert werden. Ein wichtiger Aspekt stellt die Flexibilisierung des Gesamtsystems durch Speicher dar, damit auch unabhängig von der Situation im Stromnetz Anlagen, wie beispielsweise KWK-Anlagen, betrieben werden können und in Engpasssituationen auf Wärmepumpen verzichtet werden kann.

Die Resilienz-Bewertung der Wärmeerzeugerszenarien des Klausenerplatzes zeigt, dass eine Nutzung von Abwasserwärme zu einer Diversifizierung der Wärmeversorgung beiträgt und sich somit positiv auf die Resilienz auswirken kann. Vorteilhaft mit Blick auf die Resilienz sind vor allem diejenigen Szenarien, die eine Kombination mit PV-Anlagen und Solarthermie-Anlagen vorsehen, da dann die höchsten Anteile an Diversität und loser Kopplung erreicht werden. Die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen trägt ebenfalls zu einer Steigerung der Resilienz bei.

Einschränkend in Bezug auf die Resilienz-Bewertung ist zu sagen, dass die vorliegende Bewertung auf lediglich vier Indikatoren basiert und somit nur erste Hinweise liefert. Bedingt durch die berücksichtigten Eingangs- und Ausgabeparameter des Simulationsmodells konnten nur die hier dargestellten Resilienz Gestaltungsprinzipien operationalisiert und angewandt werden. Im optimalen Fall sollten aber weitere Resilienz Gestaltungs- bzw. Design-Prinzipien operationalisiert und deren Effekte als Ganzes betrachtet werden. Für eine belastbarere Resilienzbewertung sollte die Methodik daher erweitert, justiert und validiert werden.

Die Auseinandersetzung mit dem Thema Resilienz von Wärmeversorgungssystemen bewegt sich in einem recht jungen Forschungsfeld, auf dem bisher nur wenige Akteure agieren. So waren den beteiligten Praxispartnern und Stakeholdern die Begrifflichkeiten und verwendeten Methoden meist unbekannt. Dies mag zum einen daran liegen, dass zukünftige Ausfälle der Wärmeversorgung aufgrund der bisher ins Auge gefassten Transformationspfade nur eine eher untergeordnete Rolle spielen. Diese Pfade orientieren sich meist am klassischen Risiko- und Versorgungssicherheitsverständnis. Auch werden eher kurze Ausfälle (unter fünf Stunden) von den Verbrauchern in der Regel nicht bemerkt, sodass die Maßnahmen und Intensität der Betrachtung anders sind als bei elektrischen Systemen. Letzteres gilt vor allem für Fernwärmenetze, bei denen das Verteilungsnetz und die hohe Vorlauftemperatur als Puffer für kürzere Ausfälle dienen. Im Zuge der Transformation der Wärmeversorgung und der einhergehenden Kopplung der verschiedenen leitungsgebundenen Energieträger (Strom, Gas) sowie dem vermehrten Einsatz von dezentralen lokalen Ressourcen (Solar, Abwasserwärme, Holz, Pellets) werden die Komplexität und die Abhängigkeiten auch bei der Wärmeversorgung zunehmen. Insofern erscheint die Beschäftigung mit diesem Feld nötig und sollte weiter intensiviert werden. Insbesondere bei der Definition, der für das Gestaltungleitbild Resilienz besonders wichtigen Systemleistungen und Systemgrenzen, bei der Operationalisierung geeigneter Bewertungsindikatoren und bei der Ausgestaltung einer aggregierten Bewertungsskala existiert noch immenser Forschungsbedarf. Aber auch bei der Ermittlung der Auswirkungen der Einbindung digitaler Elemente wie Smarte Zähler oder von Hilfen für die Heizungssteuerung und damit der Kopplung mit IKT und den sich damit eröffnenden Vulnerabilitäten für

Wärmenetze sollten verstärkt weitere Arbeiten durchgeführt werden. Im letztgenannten Bereich gibt es noch sehr wenige Anwendungsfälle und die konkreten Anwendungen und Auswirkungen der Digitalisierung sind bisher eher unbekannt, sodass auch hier prospektive Methoden anzuwenden sind.

### Danksagung

Einen ganz herzlichen Dank gebührt dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) in Berlin, insbesondere Elisa Dunkelberg für die hervorragende Projektkoordination und Prof. Dr. Bernd Hirschl für die anregenden Diskussionen. Außerdem möchten wir uns bei Dr. Tobias Bachmann vom Fernheizwerk Neukölln und allen Interviewpartnerinnen und Teilnehmerinnen der Workshops im Rahmen des Projektes Urbane Wärmewende Berlin für den wertvollen Austausch sehr herzlich bedanken. Wir möchten uns sehr herzlich bei Prof. em. Dr. Arnim von Gleich für das Gegenlesen des Manuskriptes und seine wertvollen Diskussionsbeiträge bedanken.

### Förderung

Diese Forschungsarbeiten wurden im Rahmen der Projekte „Urbane Wärmewende“ (Förderkennzeichen: 01UR1601B) und „QUARREE100“ (Förderkennzeichen: 03SBE113B) durchgeführt. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), sowie dem DRL Projektträger und dem Projektträger Jülich.

### Literaturverzeichnis

- AGFW (2018): Branchenspezifischer Sicherheitsstandard für die Verteilung von Fernwärme (B3S VvFw). Frankfurt an Main. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/media/documents/Awh\\_20180503\\_B3S-Verteilung-Fernwaerme.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20180503_B3S-Verteilung-Fernwaerme.pdf), zuletzt geprüft am 21.07.2020.
- Biggs, Reinette; Schlüter, Maja; Biggs, Duan; Bohensky, Erin L.; BurnSilver, Shauna; Cundill, Georgina et al. (2012): Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. In: *Annual Review of Environment and Resources* 37 (1), S. 421–448. DOI: 10.1146/annurev-environ-051211-123836.
- Binder, Claudia; Mühlemeier, Susan; Wyss, Romano (2017): An Indicator-Based Approach for Analyzing the Resilience of Transitions for Energy Regions. Part I: Theoretical and Conceptual Considerations. In: *Energies* 10 (1), S. 36. DOI: 10.3390/en10010036.
- Brand, Urte; Giese, Bernd; Gleich, Arnim von; Heinbach, Katharina; Petschow, Ulrich; Schnülle, Christian et al. (2017): Resiliente Gestaltung der Energiesysteme am Beispiel der Transformationsoptionen "EE-Methan-System" und "Regionale Selbstversorgung": Schlussbericht des vom BMBF geförderten Projektes RESYSTRA (FKZ:01UN1219A-B). Online verfügbar unter <http://www.resystra.de/files/publikationen/resystra-schlussbericht.master.pdf>, zuletzt geprüft am 19.11.2018.
- Briegleb, Volker (2016): Smart Home: Hacker übernehmen Kontrolle über Thermostat. In: *heise.de*. Online verfügbar unter <http://www.heise.de/-3291209>, zuletzt geprüft am 30.01.2020.
- Dolle, Wilhelm; Hoff, Jan (2015): KRITIS-Sektorstudie "Energie". Hg. v. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Bonn.

- Dunkelberg, Elisa; Deisböck, Alexander; Herrmann, Benjamin; Hirschl, Bernd; Mitzinger, Tino; Röder, Johannes et al. (2020a): Fernwärme klimaneutral transformieren. Eine Bewertung der Handlungsoptionen am Beispiel von Berlin Nord-Neukölln. Hg. v. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW). Berlin (Schriftenreihe des IÖW, 218/20).
- Dunkelberg, Elisa; Deisböck, Alexander; Hirschl, Bernd; Mitzinger, Tino; Röder, Johannes; Salecki, Steven et al. (2020b): Keimzellen für eine Quartierswärmeversorgung. Abwasserwärmenutzung durch Gebäude einer städtischen Wohnungsbaugesellschaft in einem Berliner Bestandsquartier, Arbeitsbericht 1. Berlin.
- Farrell, Alexander E.; Zerriffi, Hisham; Dowlatabadi, Hadi (2004): ENERGY INFRASTRUCTURE AND SECURITY. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 29 (1), S. 421–469. DOI: 10.1146/annurev.energy.29.062403.102238.
- Fischer, Lars; Lehnhoff, Sebastian (2019): IT security for functional resilience in energy systems: effect-centric IT security. In: Matthias Ruth und Stefan Goessling-Reisemann (Hg.): *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*: Edward Elgar Publishing, S. 316–340.
- Gershenson, J. K.; Prasad, G. J.; Zhang, Y. (2003): Product modularity: Definitions and benefits. In: *Journal of Engineering Design* 14 (3), S. 295–313. DOI: 10.1080/0954482031000091068.
- Gilski et al. (2014): Probability of Failure Assessment in District Heating Network. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/272504864\\_Probability\\_of\\_Failure\\_Assessment\\_in\\_District\\_Heating\\_Network](https://www.researchgate.net/publication/272504864_Probability_of_Failure_Assessment_in_District_Heating_Network), zuletzt geprüft am 15.07.2019.
- Gleich, Arnim von; Giese, Bernd (2019): Resilient Systems as a biomimetic guiding concept. In: Matthias Ruth und Stefan Goessling-Reisemann (Hg.): *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*: Edward Elgar Publishing, S. 89–99.
- Gleich, Arnim von; Gößling-Reisemann, Stefan; Lutz-Kunisch, Birgitt; Stührmann, Sönke; Woitzschke, Peer (2010): Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In: Klaus Fichter, Arnim von Gleich, Reinhard Pfriem und Bernd Siebenhüner (Hg.): *Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien: Projektkonsortium'nordwest2050'/c/o Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten eV*, S. 13–49.
- Gößling-Reisemann, Stefan (2017): Resilience—preparing energy systems for the unexpected. In: Marie-Valentine Florin und Igor Linkov (Hg.): *IRGC Resource guide on Resilience*: Lausanne, EPFL International Risk Governance Center (IRGC), S. 73–80.
- Gößling-Reisemann, Stefan; Thier, Pablo (2019): On the difference between risk management and resilience management for critical infrastructures. In: Matthias Ruth und Stefan Goessling-Reisemann (Hg.): *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*: Edward Elgar Publishing, S. 117–135.
- Hake, Jürgen-Friedrich; Rath-Nagel, Stefan (2015): Energiesicherheit: Fakten und Handlungsmöglichkeiten. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 65 (4), S. 28–33. Online verfügbar unter [http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen\\_2015\\_04\\_hake.pdf](http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2015_04_hake.pdf), zuletzt geprüft am 12.02.2019.
- Holling, C. S. (1973): Resilience and Stability of Ecological Systems. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, S. 1–23. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/2096802>.

- Jung, Jens-Philipp (2017): Trauriger Rekord: DDoS-Gefahr schon wieder gestiegen. In: *News&Stories*. Online verfügbar unter <https://www.exali.de/Info-Base/gefahr-DDoS>, zuletzt geprüft am 30.01.2020.
- Linkov, Igor; Anklam, Elke; Collier, Zachary; DiMase, Daniel; Renn, Ortwin (2014): Risk-based standards: Integrating top-down and bottom-up approaches. In: *Environment Systems and Decisions* 34. DOI: 10.1007/s10669-014-9488-3.
- Lovins, Amory B.; Lovins, L. Hunter (1982): *Brittle power*: Brick House Publishing Company.
- Mitzinger, Tino; Röder, Johannes; Thier, Pablo (2020): Operationalization and Application of Resilience Enhancing Design Principles for District Heating Systems. In: Piero Baraldi, Francesco Di Maio und Enrico Zio (Hg.): e-proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (ESREL2020 PSAM15). Singapore: Research Publishing Services.
- Molyneaux, Lynette; Brown, Colin; Wagner, Liam; Foster, John (2016): Measuring resilience in energy systems: Insights from a range of disciplines. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, S. 1068–1079. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.063.
- Ostrom, Elinor (2010): Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. In: *Global environmental change* 20 (4), S. 550–557.
- Perrow, Charles (2011): *Normal accidents: Living with high risk technologies*-Updated edition: Princeton university press.
- Peterson, Garry; Allen, Craig R.; Holling, Crawford Stanley (1998): Ecological resilience, biodiversity, and scale. In: *Ecosystems* 1 (1), S. 6–18.
- Reusswig, Fritz; Hirschl, Bernd; Lass, Wiebke (2014): *Klimaneutrales Berlin 2050–Ergebnisse der Machbarkeitsstudie*.
- Rimkevicius et al. (2012): Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.015>, zuletzt geprüft am 02.07.2019.
- Stirling, Andy (2007): A general framework for analysing diversity in science, technology and society. In: *Journal of the Royal Society Interface* 4 (15), S. 707–719. DOI: 10.1098/rsif.2007.0213.
- Stirling, Andy (2010): Multicriteria diversity analysis. A Novel Heuristic Framework for Appraising Energy Portfolios. In: *Energy Policy* 38 (4), S. 1622–1634. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.02.023.
- Tereshchenko, Tymofii; Nord, Natasa (2016): Importance of Increased Knowledge on Reliability of District Heating Pipes. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/Natasa\\_Nord/publication/304715254\\_Importance\\_of\\_Increased\\_Knowledge\\_on\\_Reliability\\_of\\_District\\_Heating\\_Pipes/links/57baeff08ae3b9d9b1cd003/Importance-of-Increased-Knowledge-on-Reliability-of-District-Heating-Pipes.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Natasa_Nord/publication/304715254_Importance_of_Increased_Knowledge_on_Reliability_of_District_Heating_Pipes/links/57baeff08ae3b9d9b1cd003/Importance-of-Increased-Knowledge-on-Reliability-of-District-Heating-Pipes.pdf), zuletzt geprüft am 15.07.2019.
- Valincius et al. (2015): Integrated assessment of failure probability of the district heating network. Online verfügbar unter <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0951832014002385?to-ken=50FB96C917E53378BD08794166CE4F8ABAD47554A48486FFAF0F01E028E6ACFF274DDE254DEF4A2FA8F466C9E039DA1C>, zuletzt geprüft am 02.07.2019.

Wirths, A. (2008): Einfluss der Netzzrücklauf­temperatur auf die Effizienz von Fernwärmesystemen. Online verfügbar unter [https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/ressourcen/dateien/forschung\\_und\\_projekte/projekte/mldh/vortraege/wirths\\_ruecklauf­temperatur\\_13\\_dresdner\\_fernwaermekolloquium.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/ressourcen/dateien/forschung_und_projekte/projekte/mldh/vortraege/wirths_ruecklauf­temperatur_13_dresdner_fernwaermekolloquium.pdf?lang=de), zuletzt geprüft am 09.07.2019.